

# Структурно- функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере

НАУКА

К 250-летию  
Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова

RUSSIAN  
ACADEMY  
OF SCIENCES

M.V. LOMONOSOV  
MOSCOW  
STATE  
UNIVERSITY

INSTITUTE OF SOIL SCIENCE

# **Structural and Functional Role of Soils and Soil Biota in the Biosphere**



MOSCOW NAUKA 2003

РОССИЙСКАЯ  
АКАДЕМИЯ  
НАУК

МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ИНСТИТУТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

# **Структурно- функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере**



МОСКВА НАУКА 2003

УДК 631.4  
ББК 40.3  
С87

**А в т о р ы:**

Г.В. Добровольский, И.П. Бабьева, Л.Г. Богатырев, А.С. Владыченский,  
В.Д. Васильевская, В.Г. Витязев, Ю.В. Горелова, В.В. Демин, Е.А. Дмитриев,  
Н.Г. Добровольская, Т.Г. Добровольская, Ф.Р. Зайдельман, Д.Г. Звягинцев,  
Г.М. Зенова, Т.А. Зубкова, Л.С. Ильина, Л.О. Карпачевский, Л.В. Лысак,  
М.С. Кузнецов, Г.С. Куст, О.Е. Марфенина, В.Г. Минеев, Л.Ф. Литвин,  
Е.Д. Никитин, Д.С. Орлов, И.В. Рекубратский, Б.Р. Стриганова, М.Н. Строганова,  
В.О. Таргульян, С.Я. Трофимов, М.М. Умаров, И.С. Урусевская, А.Д. Флесс,  
Е.В. Шеин, С.А. Шоба

Ответственный редактор  
академик Г.В. ДОБРОВольский

**Редакционная коллегия:**

В.Д. ВАСИЛЬЕВСКАЯ, Д.Г. ЗВЯГИНЦЕВ, Л.О. КАРПАЧЕВСКИЙ,  
В.Г. МИНЕЕВ, Е.Д. НИКИТИН, С.А. ШОБА

**Рецензенты:**

доктор биологических наук А.И. ПОЗДНЯКОВ,  
доктор сельскохозяйственных наук И.М. ЯШИН

**Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере /**  
Г.В. Добровольский, И.П. Бабьева, Л.Г. Богатырев и др. / Отв. ред. Г.В. Доброволь-  
ский. – М.: Наука, 2003. – 364 с. –  
ISBN 5-02-002832-0 (в пер.)

В книге освещена роль почвы и почвенной биоты, их экологические функции при взаи-  
модействии с природными и антропогенными системами (биосферой, литосферой, гидросфе-  
рой, атмосферой, антропосферой). Анализируется функциональная активность химических,  
физических, биологических свойств почв в глобальных процессах, включая эрозию, продук-  
тивность, формирование лесной биосферы и растительного покрова в целом.

Для почвоведов, географов, геоботаников, микробиологов и биогеоценологов.

По сети АК

ISBN 5-02-002832-0

© Российская академия наук, 2003

© Издательство “Наука”

(художественное оформление), 2003

## О МЕСТЕ ПОЧВЫ И ПОЧВЕННОЙ БИОТЫ В БИОСФЕРЕ

В начале XXI в. естественно стремление многих научных дисциплин подвести итоги прошлого и заглянуть в будущее. Это относится и к науке о почве. Современный этап ее развития требует самого тщательного анализа, ясного понимания роли почвы в жизни природы и развитии нашей цивилизации. Сто лет назад В.В. Докучаев отметил, что из всех стихий природы (царств, компонентов) только почва никогда не вредила человеку, а напротив, всегда кормила его и сохраняла окружающий человека мир. Но этого нельзя сказать о роли человека в сохранении почвенного покрова. Уничтожение почвенного покрова на значительной территории, загрязнение почв, ухудшение их свойств – вот итог хозяйственной деятельности человека на громадных просторах обрабатываемых земель.

За исторический период человечество уже утратило около 1,5–2,0 млрд га некогда плодородных почв, превратив их в пустыни. Это больше, чем вся площадь современного мирового земледелия, равная 1,5 млрд га. Ежегодно из сельскохозяйственного использования выбывает около 8 млн га за счет отчуждения на другие хозяйственные нужды и около 7 млн в результате различных видов деградации почв – эрозии, загрязнения, засоления и т.п. Ускоренная эрозия почвенного покрова представляет по мнению ведущих экологов мира одну из самых опасных глобальных угроз экологического кризиса планеты Земля.

Два взаимосвязанных явления характерны для нашего времени: замещение биосферы техносферой и замена почв с их естественными экологическими функциями почвоподобными телами, искусственными почвами с ограниченным количеством экологических функций, практически, одной – воспроизводство сельскохозяйственных растений, вместо многочисленных функций, свойственных естественной почве. Замещение биосферы техносферой исключает множество экологических отношений в биосфере, сохраняя лишь часть обитателей биосферы, обрекая другие виды на вымирание, упрощает трофическую сеть, превращая ее в более простые цепи. В то же время многие земледельцы, использующие почву в техносфере, представляют ее сосудом с питательными веществами, необходимыми растениям, содержанием которых можно управлять простым внесением удобрений. В результате отмечается пренебрежение почвой, ее ролью в биосфере и техносфере, ее экологическими функциями, нарушения почвенного покрова, уничтожение гумусового слоя, загрязнение почв, в том числе и при химизации сельского хозяйства. При этом, если еще эрозия, дефляция, загрязнение почв как-то учитывается, отмечается на картах, то на изменение экологических функций почв практически не обращается внимание.

И хотя всем известно, что сельскохозяйственное использование почв сокращает биоразнообразие, это явление не связывают с изменением набора и степени проявления экологических функций почв.

Как ни велико значение почвы в качестве основы сельского хозяйства, все же оно составляет лишь часть той незаменимой экологической роли, которую играет почва в биосфере и жизни человека.

Еще в начале XX в. В.И. Вернадский предупреждал: “Нельзя забывать, что почвы переполненные живым веществом не являются косными естественными телами. Это сложные естественные тела, закономерно построенные из живых и косных естественных тел, биокосные природные тела биосферы\*\*”.

Почвенный покров Земли представляет тончайшую оболочку планеты с мощностью всего 1,0–1,5 м, густо населенную самыми разнообразными видами растений, животных и микроорганизмов. По данным известного ученого-генетика Т. Добжанского число видов сухопутных животных, так или иначе связанных с почвой, составляет 93% от общего числа видов, водных – только 7%. То же соотношение характерно и для растений – 92% сухопутных и 8% водных. Биомасса организмов на земной суше в несколько тыс. раз больше, чем в океане. Эти данные показывают, что возможность видообразования в процессе эволюции жизни на суше была значительно больше, чем в водной среде. Причина тому, как убедительно показал другой видный ученый зоолог М.С. Гиляров, в том, что почва исключительно разнообразна как среда обитания: в ней представлены и воздушная, и водная, и твердая фазы состояния вещества, и минеральная, и органическая, пригодные для жизни как автотрофов, так и гетеротрофов\*\*.

Как известно, В.В. Докучаев выделил почву как особое естественно-историческое тело, неразрывно связанное в своем происхождении (генезисе) и свойствах с окружающей почву средой и климатом, почвообразующей породой, рельефом местности, растительными и животными организмами. Это понятие о почве Докучаев рассматривал как аксиому, как краеугольный камень почвоведения\*\*\*. Это положение во многом определило развитие почвоведения в первой половине XX в. Генезису почв было посвящено множество работ, особенно в России, поскольку на ее просторах действие факторов почвообразования было заметнее и легче поддавалось изучению и осмыслению. Установлено, что генезис почв приводит к созданию набора морфологических свойств, оригинального профиля почвы. Специфичность почв прежде всего проявляется в их строении, морфологических свойствах. Именно макро- и микростроение почв – первая основа формирования экологических ниш биосферы, приводящая к биологическому разнообразию биосферы и экологическому функционированию самих почв. Почвы отличаются от почвообразующих пород в первую очередь своей структурой и гумусированностью хотя бы самого верхнего слоя. Структура почвы отличается на всех уровнях: на молекулярном – изменением минералов почвообразующих пород, включая изоморфные замещения, появлением новых молекул как органических, так и неорганических соединений, формированием специфических для почв агрегатов (часто, как в случае черноземов и серых лесных почв – главного различия почв), превращением изотропной геологической породы в анизотропную почву, у которой по вертикальной оси формируются генетические горизонты, а по горизонтальной – чередуются разные морфоны.

\* Докл. АН СССР. 1938. Т. 21, № 3. С. 127–129.

\*\* Зоологический журнал. 1944. Т. 23. В. 4. С. 135–138.

\*\*\* Докучаев В.В. Соч. Т. 1. 1949. С. 378.

Строение почв сопряжено с другими их свойствами: химическими и физическими, которые все вместе позволяют классифицировать почвы, разделив континуум почв на дискретные объемы: зоны, провинции, районы, типы, роды и пр. Такое деление может лежать в основе классификации почв по характеру и выраженности их экологических функций. Классификация почв, построенная на докучаевских принципах, позволяет оценить экологические функции почв и их варьирование в зависимости от типа почвы.

Сначала связь свойств и разнообразия почв с факторами почвообразования в основном оценивалась качественно и преимущественно сравнительно-географическим методом, что и послужило основанием учения о зонах природы, почвенных провинциях и фациях, структурах почвенного покрова. В дальнейшем все большее внимание уделялось изучению физических и химических свойств различных почв и почвенных процессов, установлению связи их с факторами (условиями) почвообразования. В этом направлении были достигнуты большие успехи, позволившие разрабатывать классификацию почв и совершенствовать способы улучшения их свойств, в том числе повышения плодородия почв. При этом устанавливались и использовались уже количественные характеристики почвенных процессов и их связей с воздействием на почву природных и антропогенных факторов.

Несравненно меньшее внимание уделялось изучению тех функций почвы, которые определяют экологическую роль и значение почв в качестве неотъемлемого компонента наземных экосистем и биосферы Земли в целом.

Она определяет существование всего многообразия экосистем биосферы и в этом главное экологическое значение почв. Неотъемлемый компонент структуры наземных экосистем (БГЦ) – почва – выполняет множество экологических функций, обеспечивающих жизнь обитающих в почве и на почве растительных и животных организмов. Это и дает право называть почву полифункциональной природной системой.

Экологические функции почвы в своем проявлении обусловлены морфологическими, физическими и химическими свойствами почв. Плотность почв, степень обводнения почвенных пор, доступность почвенной воды растениям и микроорганизмам, тепловой режим почв – определяют возможность существования тех или иных растений, педофауны, микроорганизмов. В неменьшей степени влияет химический состав почв, концентрация растворимых солей, состав обменных катионов, кислотность почв, содержание и состав гумуса и т.п.

Биота, в какой-то мере являясь функцией окружающих условий, в том числе и почвы, в свою очередь меняет экологические функции почвы, усиливает или ослабляет их (роль растений в накоплении гумуса, в изменении порового пространства, в агрегированности почв, влияние червей, педофауны в целом, микроорганизмов на структуру почв, на доступность растениям питательных веществ и т.д.). Экологические функции биоты можно оценивать как их способность изменять окружающие условия, и, в том числе циклы химических элементов. Биота усиливает миграцию одних элементов и замедляет или закрепляет другие. Именно поэтому экологические функции биоты оцениваются ниже с точки зрения изменения экологических функций среды обитания – почвы, в рамках экологических функций экосистемы в целом.

Кроме традиционно изучаемых физических, химических и биологических функций почв, в наш век все большее внимание уделяется информационным функциям почв. Особенно интересной оказалась способность почвы сохранять в своем составе, строении и свойствах свидетельство о прошлых временах и эпохах почвообразования. Эта информационная функция почвы все чаще исполь-



зуется в палеопочвоведении, палеогеографии, археологии и истории человеческого общества. На стыке археологии и почвоведения формируется новое научное направление – археологическое почвоведение.

Все более интенсивно развивается в последние годы изучение погребенных почв прошлых геологических эпох, в которых находят останки и следы жизнедеятельности почвенной биоты. В связи с этим в современной биологии настойчиво разрабатывается мысль о том, то эволюция разных форм жизни на Земле происходила совместно с эволюцией сред обитания, т.е. в виде эволюции экосистем [Заварзин, 1997].

О важной роли почвы в эволюции жизни на Земле писал и В.И. Вернадский, когда характеризовал почвенный покров суши в своей “Биосфере” [1927] как “живую пленку” планеты и указывал, что “...значение почв в истории планеты гораздо большее, чем это обычно кажется”.

Современный почвенный покров планеты представляет собой сложную систему, состоящую из почв-компонентов естественных экосистем и почв разной степени нарушенности, почвоподобных тел, искусственных почв и разной степени рекультивированных отвалов. Различия в почвенном покрове отражают деление биосферы на собственно биосферу и техносферу, экосистемы, созданные человеком и для человека. Как уже говорилось выше, все антропогенные почвы ограничены в своих экологических функциях в результате хозяйственной деятельности человека. Биосфера поддерживает биоразнообразие, техносфера как среда, созданная человеком, стремится оставить или создать только те организмы, которые необходимы для жизни человека. И хотя уже появилось понимание необходимости сохранить генофонд планеты, но пока реальная действительность показывает, что биоразнообразие стремительно уменьшается.

Почвенный покров или педосфера, как глобальная природная оболочка суши, оказывает воздействие на другие природные геосферы, такие, как атмосфера, гидросфера, литосфера.

Разносторонность этого воздействия убедительно показана в материалах крупного международного симпозиума “Функции почв в биосферно-геосферных системах”, состоявшегося в Московском университете им. М.В. Ломоносова в 2001 г.

Воздействие почвенного покрова на другие геосферы проявляется как в прямом изменении их химического состава, так и в их эволюции.

Начиная по крайней мере с мелового периода, процессы геологической эрозии в большей мере переносят почвенные материалы, включенные в почвообразование, чем собственно материал горных пород. Поэтому осадочные породы этого и более поздних периодов следует рассматривать (по крайней мере значительную часть их) как материал, прошедший цикл почвообразования. Это – нормальная геологическая, очень медленная эрозия, приводящая к денудации и выравниванию поверхности Земли.

Литосфера, перекрытая почвой, не остается неизменной и подвергается процессам разрушения, выветривания, преобразования, включая процесс, который можно назвать педолизом: это – разрушение горной породы под воздействием почвенных процессов (аналогично гидролизу – разрушению под действием воды).

В отношении гидросферы Земли почвенный покров выступает в качестве фильтра – преобразователя состава атмосферных осадков, формируя химический состав почвенно-грунтовых вод и речного стока в Мировой океан. Тем самым, почвенный покров суши влияет на химический состав океана, а значит, и на его биоту.

Выделение почвой диоксида углерода, метана и других газов (“дыхание почвы”) оказывает существенное влияние на состав атмосферного воздуха, особенно приземных его слоев. Газовые функции почв привлекают все большее внимание ученых в связи с “парниковым” эффектом, угрожающим общим потеплением климата Земли.

Рассматривая почву как экологическое звено между гетеротрофами и автотрофами, растениями, животными и микроорганизмами, можно оценить экологические функции почвы как глобальную адаптацию почвенной биоты к земным условиям. В то же время деятельность человека сопровождается нарушением сложившихся отношений и редукцией ряда экологических функций. Одна из этих редуцированных функций – функция нейтрализации продуктов метаболизма животных и превращения их в питательные вещества для растений. Эта функция нарушается двумя группами антропогенных процессов: непосредственной деградацией почв в результате деятельности человека (эрозия, загрязнение, изъятие почвы из экосистемы) и отчуждением продукции агроэкосистем из агроценозов.

Эрозия поверхности суши в целом нормальный геологический процесс, приводящий к образованию новых площадей осадочных пород – этого фундамента для последующего почвообразования и формирования экосистем на данной территории. Но, когда деятельность человека существенно (на два-три порядка) ускоряет скорость эрозионных процессов, эрозия превращается в главный фактор деградации почв. Восстановление присущих почве экологических функций в этом случае требует специальных приемов, в первую очередь, формирования гумусового горизонта, который наиболее активно регулирует скорость нейтрализации отходов, поступающих в почву из “зоосферы”.

Отчуждение продукции из агроэкосистем усиливает дисбаланс между обеспечением растений питательными элементами и переработкой отходов зоосферы. Этот дисбаланс усугубляется тем, что основное потребление в современном мире территориально разобщено с производством сельскохозяйственной продукции. Город вынужден увозить продукты питания не только из агроценоза, но даже из данной страны. При этом все отходы уже не поступают в почву, а образуют свалки вблизи городов, утилизация которых зависит от уровня развития культуры и промышленности страны.

В связи с этим органические и минеральные удобрения, в какой-то степени, компенсируют ослабление указанной экологической функции.

Как видно из сказанного, учение об экологических функциях приводит почвоведение к тесному контакту с агрохимией, возникает союз наук для восстановления редуцированных экологических функций почв. А сама агрохимия становится важной теоретической частью общей экологии биосферы. С этой точки зрения необходимо рассматривать и мелиорацию почв, которая изменяет экологические свойства почв, создавая совершенно другие условия их функционирования. Поскольку функция продуктивности почв наиболее важна для человека при сельскохозяйственном производстве, то агрохимия и мелиорация призваны наиболее рационально решить эту проблему. Но, так как при этом происходит потеря биологического разнообразия в биосфере, то создание условий для сохранения и восстановления биоразнообразия – это вторая сторона производственной деятельности человека, которая до последнего времени, к сожалению, далеко не соответствовала масштабам сельскохозяйственной деятельности. Именно эта задача восстановления условий сохранения биоразнообразия на Земле приобрела исключительную актуальность. С ней связаны задачи сохранения разнообразия почв, структуры почвенного покрова, сохранения естествен-

ных, в том числе редких и исчезающих почв. Они получили отражение в новом законе “Об охране окружающей среды” 2002 г.

Лишь с 1970–1980-х гг. в связи с обострением экологических проблем резко усилился интерес к познанию экологического значения почв. Это и положило начало разработке учения об экологических функциях почв, которое стало новым разделом почвоведения.

Предлагаемая читателям монография посвящена новому структурно-функциональному подходу к оценке места и роли почв в биосфере. Дальнейшее развитие получают в ней общие принципы структурно-функционального анализа физических, химических и биологических свойств и экологических функций почв, опубликованные в последние годы во многих работах.

В современном естествознании постепенно укрепляется представление о почвенном покрове Земли как об особой геосферной оболочке, характеризующейся наибольшей плотностью жизни. Она получила название педосферы (от греческого “pedon” – почва). Ее изучение связано прежде всего с именами В.В. Докучаева, В.И. Вернадского и В.А. Ковды.

Наибольшее внимание уделено в настоящей монографии рассмотрению разнообразия экологических функций почв в наземных экосистемах и биосфере в целом, а также в жизни человека.

Среди экологических функций можно выделить самую главную и общую – почва служит средой обитания живых организмов: растений, микроорганизмов, грибов, животных. Выше уже было отмечено, что биомасса наземных экосистем в тысячи раз превышает биомассу Мирового океана, хотя площадь суши в три раза меньше; значительно выше и видовое разнообразие наземных растительных и животных организмов по сравнению с обитателями водной среды. Иными словами, биоразнообразие населения суши в значительной степени определяется разнообразием почв и их экологических функций.

Вторая важнейшая экологическая функция почвы связана с тем, что почва – центральное звено во взаимодействии геологического и биологического круговоротов (циклов) вещества в биогеосфере.

Именно через почву и почвенный покров проходят сложнейшие процессы обмена веществом и энергией между земной корой, атмосферой и гидросферой суши со всеми обитающими на земле организмами, включая и человека.

Не менее важна третья экологическая функция почвы – функция преобразования и утилизации отходов жизнедеятельности растений и животных в новый источник их жизнедеятельности. Через почву осуществляется взаимодействие растений, микроорганизмов и животных: нейтрализуются продукты распада животных и растений. Продукты распада переводятся в доступные растениям формы, поставляют те питательные вещества, которые содержались в живых организмах. Почва – главная арена этих превращений.

Одной из главных функций почвы, определяющей вместе с климатом продуктивность естественных и искусственных экосистем, является плодородие почв, значение которого чрезвычайно велико в жизни не только биосферы (и не столько), но и человека. Именно плодородие почв является основой существования человека и его социальной эволюции. Плодородие, как экологическая функция, уже представлено во многих работах в виде математических формул, что показывает возможность более широкой и глубокой математизации почвоведения.

Можно принять, что экологические функции естественных почв определяются тремя группами их свойств: физическими (плотность, порозность, удельная поверхность, водопроницаемость), химическими (химический состав почв,

ила, физико-химические свойства, рН, сумма и состав обменных катионов, количество доступных для растений питательных веществ) и биологическими (общим количеством действующей биоты, связанной с биотой скоростью трансформации органического вещества, детрита, гумуса). Значимость функций оценивают по их проявлению: создание условий для поселения организмов, их снабжение влагой и питательными веществами, сохранение семян, биогеохимические циклы и т.д. Именно многообразие экологических функций почв определяет биологическое разнообразие в наземных экосистемах. Возникновение у горных пород экологических функций как результат их включения в экосистему, приводит к тому, что экосистема приспосабливается к новой экологической ситуации, и эволюция живых организмов идет именно в экосистеме, при постоянно меняющихся по степени своего проявления экологических функциях. Оценивая экологические функции почв, что поддается даже количественной оценке, можно выявить направление развития почв.

Используя экологические функции почв, можно рассматривать почву как постоянный реактор, в котором генерируются доступные для растений питательные вещества, вода, воздух. Очевидно, что при сходстве ряда свойств почв, которые на качественном уровне не отличаются, введение понятий “экологические функции” позволяет расчленивать, разделить близкие по некоторым свойствам почвы. Так, южные черноземы и темно-каштановые почвы отличаются по количественной выраженности свойств, но не различаются по качественным критериям общего хода почвообразования, нет принципиальной разницы и в формировании их свойств. Количественная оценка экологических функций позволяет различать почвы. Например, экологически различаются луговые и дерновые почвы именно по выраженности разных функций (снабжение растений питательными веществами, водой, кислородом). Для почв суходольных лугов и пахотных угодий важно сохранение запасов семян, способных восстановить популяцию растений при прекращении хозяйственного воздействия.

Экологическая характеристика водного режима в этих условиях приобретает важное значение именно как проявление функции снабжения растений водой. Питательный режим в гидроморфных и автоморфных почвах будет также количественно различаться и служить той характеристикой, которая будет отражать генезис этих почв. Возможность количественной оценки экологических функций позволяет надеяться на углубление понимания наших почв как постоянно действующих экологических реакторов, вырабатывающих определенные вещества и “условия существования” для растений, микроорганизмов, животных. Количественная оценка функций связана с изучением динамики ряда свойств экосистем, в том числе их водного режима, питательного режима, продуктивности, биогеохимической функции барьера, окислительно-восстановительных условий, буферности к разного рода воздействиям.

Пока мы не имеем набора математических описаний разных функций, но теоретически это можно сделать на меньшем объеме материала, чем, например, оценку динамики свойств почв как основы почвенного процесса.

В разных ландшафтах (естественных и искусственных) экологические функции почвы количественно различаются, что коррелирует с особенностями экосистем. Любое изменение в экосистеме, в том числе замена естественной экосистемы искусственной (например, агроценозом), приводит к новым аспектам в проявлении экологических функций, что необходимо учитывать при планировании использования земель.

Процессы деградации почв, эрозии, удобрения и мелиорации влияют на экологические функции почв. Совершенно естественно из анализа экологических

функций почв техносферы вытекает вывод о необходимости всемерной охраны почв от разрушения и загрязнения при их хозяйственном использовании, а также создании почвенных заповедников и заказников для сохранения естественных и хорошо окультуренных почв.

Содержащиеся в настоящей монографии материалы показывают, что представления о структурной организации и функциях почв в биосфере и техносфере уже давно имели место в разных разделах почвоведения. Однако только систематизация и обобщение знаний о разнообразии функций почв позволило развить новое функционально-экологическое направление в современном генетическом почвоведении и показать незаменимую экологическую роль почв в биосфере и жизни человека.

---

---

## ЧАСТЬ I

---

---

# МЕСТО ПОЧВЫ В СТРУКТУРЕ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ И БИОСФЕРЫ

## ВВЕДЕНИЕ

Генезис почв приводит к созданию набора морфологических свойств, оригинального профиля почвы. Специфичность почв прежде всего проявляется в их строении, морфологических свойствах. Именно макро- и микростроение почв – первая основа формирования экологических ниш биосферы, приводящая к биологическому разнообразию биосферы и экологическому функционированию самих почв. Почвы отличаются от почвообразующих пород в первую очередь своей структурой и гумусированностью, хотя бы самого верхнего слоя. Изменения породы идут на всех уровнях: на молекулярном – изменение минералов почвообразующих пород, включая изоморфные замещения, появление новых молекул как органических, так и неорганических соединений; на мезоуровне – формирование специфических для почв агрегатов (часто, как в случае черноземов и серых лесных почв – главного различия почв). Главная особенность почвообразования – превращение изотропной геологической породы в анизотропную почву, у которой по вертикальной оси формируются генетические горизонты, а по горизонтальной – чередуются разные морфоны. Строение почв сопряжено с другими свойствами: химическими и физическими, которые все вместе позволяют классифицировать почвы, разделив континуум почв на дискретные объемы: зоны, провинции, районы, типы, роды и пр. Такое деление может лежать в основе классификации почв по характеру и выраженности их экологических функций. Классификация почв, построенная на Докучаевских принципах, позволяет оценить экологические функции почв и их варьирование в зависимости от типа почвы.

Структура биосферы определяется двумя “стихиями”: водными экосистемами (Мировым океаном, озерами, реками) и наземными (сушей). Целесообразно, следуя предложению Н.В. Дылиса, разделить биосферу на биогидросферу и биогеосферу. Во многом законы их формирования – общие, но сам субстрат этих сфер определяет их различия. В биогидросфере главную роль играет вода, определяющая континуальность биогидросферы, высокую подвижность и пределы концентрации разных веществ в воде, их циклы. В биогеосфере на первое место как поглотитель и регулятор миграции веществ в биосфере выходит почва. Она определяет определенную дискретность биосферы, большее количество экологических ниш, чем в биогидросфере, что приводит к большему биологическому разнообразию живого компонента биосферы. Почвы оказывают значительное влияние на биогидросферу, определяя биогеохимию вод и донных осадков. Биогидросфера воздействует на климат биосферы, что оказывает влияние на распределение почв и живого компонента биогеосферы.

Биогеосфера (педосфера, почвенный покров суши) имеет зонально-провинциальный (зонально-региональный) тип строения, отражающий все разнообразие природных и антропогенных факторов почвообразования.

## *Глава 1*

### **ПОНЯТИЕ О ПОЧВЕ КАК ОСОБОМ ЕСТЕСТВЕННО-ИСТОРИЧЕСКОМ ТЕЛЕ**

Почва представляет собой самостоятельное природное тело, так же как самостоятельными природными телами являются горные породы, природные воды, атмосфера. Однако это положение, составляющее аксиому современного естествознания, не всегда пользовалось признанием.

Человек получил первые представления о почве с появлением земледелия; на основании земледельческого опыта сложилось представление о почве как об относительно рыхлом поверхностном слое Земли, который служит субстратом для наземных растений и средством получения сельскохозяйственной продукции. Такой утилитарный, а не естественно-научный взгляд на почву, вполне удовлетворял человечество в течение нескольких тысячелетий и не требовал ее выделения в качестве самостоятельного природного образования. Однако появление перед человечеством глобальных проблем голода, дефицита земельных ресурсов, падения плодородия, необходимости интенсификации сельскохозяйственного производства, а затем и первых экологических проблем, продемонстрировали недостаточность подобных воззрений на почву. Необходимость решения этих актуальных проблем привела к возникновению в XIX в. (точнее в 1883 г.) новой науки – почвоведения. Появление почвоведения в качестве самостоятельной фундаментальной науки, возникшей в ответ на насущные запросы практической деятельности человека и развивающегося естествознания, со всей очевидностью показало, что почва является самостоятельным телом природы, сущность которого определяется не утилитарными представлениями человека, а естественными законами природы, специфичными для этого уникального природного образования.

Формирование почвоведения как фундаментальной науки было невозможно без определения его предмета – почвы, признания за ней права на выделение в качестве самостоятельного природного тела, отличного от всех других природных образований. Заслуга осознания почвы именно в этом качестве принадлежит нашему великому соотечественнику Василию Васильевичу Докучаеву (1846–1903). Ему же принадлежит и первое определение почвы, данное с естественно-научных, а не прикладных, утилитарных позиций. В.В. Докучаев определил почву как "...поверхностно лежащие минерально-органические образования, которые всегда более или менее сильно окрашены гумусом и постоянно являются результатом взаимной деятельности следующих агентов: живых и отживающих организмов (как растений, так и животных), материнской горной породы, климата и рельефа местности". С развитием естествознания в это определение вносили дополнения и уточнения его ученики и последователи. Современные определения почвы вероятно отличаются большей строгостью, но все они базируются на методологической основе докучаевского определения почвы как самостоятельного естественно-исторического тела.

Сделанное В.В. Докучаевым определение почвы сыграло выдающуюся роль в развитии почвоведения прежде всего потому, что оно четко определило предмет этой новой науки; наличие самостоятельного предмета исследования является, как известно, необходимым условием существования любой науки.

Помимо того, что естественно-научное определение почвы поставило ее в ряд самостоятельных природных тел, чрезвычайно важно, что согласно докучаевскому определению почва – это явление историческое, имеющее свой возраст и историю образования и эволюции. Наконец, указание на то, что почва – функция внешних по отношению к ней факторов, подчеркивало наличие функциональных связей между почвой и всеми другими природными телами и явлениями.

Идея о наличии функциональных связей между почвой и другими компонентами биосферы оказалась чрезвычайно плодотворной для развития почвоведения, так и естествознания вообще. Именно идеи такого рода послужили основой для возникновения экологии, биогеоценологии и для формирования экологического мировоззрения вообще.

Почва является продуктом трансформации верхней части коры выветривания под воздействием совокупного влияния солнечного тепла, атмосферной влаги, растительности и животных организмов.

Каждый из этих факторов, определяющих почвообразование, вносит свой вклад в формирование почвы, воздействие каждого на почву специфично и незаменимо.

Тепло и влага являются ведущими факторами, определяющими в конечном итоге пределы существования живой материи, дифференциацию различных ее форм в пределах земного шара. Подобное соображение вполне справедливо и по отношению к почве. Наиболее общие закономерности почвообразования и дифференциации почвенного покрова в пределах суши Земли определяются поступлением тепла и увлажненностью территории.

Источником энергии для процессов почвообразования является солнечная радиация. В наиболее общем виде масштабы ее поступления на Землю характеризует солнечная постоянная, показывающая количество солнечной энергии, поступающей к верхней границе атмосферы, и составляющая 8,25 дж/см<sup>2</sup>мин [Алексеев, 1975]. Проходя через атмосферу, солнечная радиация претерпевает существенные изменения вследствие поглощения энергии в отдельных частях спектра озоном, водяным паром, углекислым газом и кислородом. Значительно (в несколько раз) уменьшается ее количество и существенно изменяется спектральный состав. Полностью отсутствуют ультрафиолетовые лучи и близкие к ним составляющие (лучи с длиной волны менее 290 нм) за счет поглощения их озоном и резко снижается доля радиации в нескольких узких полосах дальней красной и ближней инфракрасной областей, что обусловлено главным образом поглощением водяным паром. В целом, происходит смещение максимума радиации от синей области спектра к красной [Алексеев, 1975].

При прохождении солнечных лучей через толщу атмосферы они частично рассеиваются парами воды, пылевыми частицами и аэрозолями. Это приводит к появлению рассеянной солнечной радиации, доля которой возрастает при уменьшении прозрачности атмосферы. Суммарное количество прямой и рассеянной радиации характеризует общее количество энергии, поступающей на земную поверхность. Часть этой энергии отражается поверхностью Земли, а часть поглощенной энергии излучается обратно в атмосферу. Радиационный баланс земной поверхности описывается формула  $R = (Q + q)(1 - A) - e$ , где  $R$  – радиационный баланс, кДж/см<sup>2</sup>год;  $Q$  – прямая солнечная радиация, кДж/см<sup>2</sup>год;



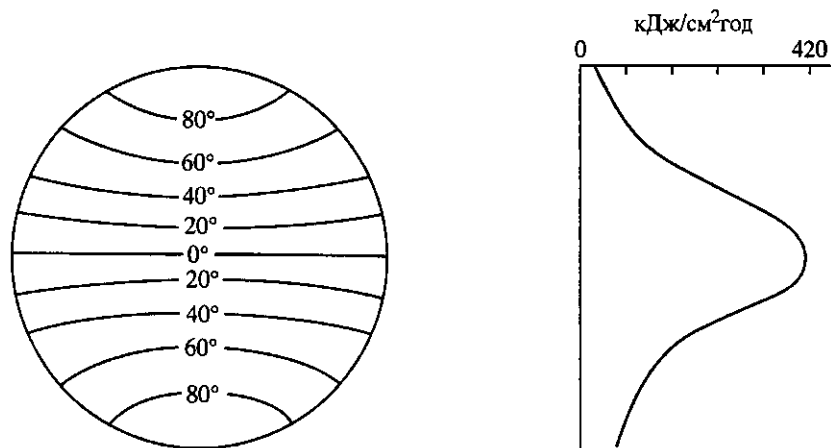


Рис. 1. Зависимость поступления солнечной радиации от широты местности [Розанов, 1977]

$q$  – рассеянная солнечная радиация, кДж/см<sup>2</sup>год;  $A$  – альbedo (показатель, характеризующий отражательную способность поверхности), в долях единицы;  $e$  – эффективное излучение поверхности (показатель, характеризующий количество энергии, излучаемой земной поверхностью, кДж/см<sup>2</sup>год.

Радиационный баланс показывает количество солнечной радиации, которое накапливает земная поверхность и которое может быть использовано в процессах почвообразования.

Количество поступающей солнечной радиации зависит от широты местности (рис. 1). В соответствии с поступлением солнечной радиации на Земле формируются термические пояса (табл. 1). При этом необходимо отметить, что указанная зависимость поступления солнечной радиации (и радиационного баланса) от широты местности почти одинаково проявляется во всех частях Земного шара, поэтому термические пояса имеют субширотную ориентацию.

Попадающая часть поступающей на Землю солнечной энергии расходуется на нагревание и испарение воды (включая транспирацию); на биологические процессы и трансформацию органического вещества тратится примерно в сто, а на выветривание минералов – в десять тысяч раз меньше.

В целом интенсивность почвообразования возрастает с повышением температуры. Скорость химических реакций, согласно известному правилу Вант-Гоффа, возрастает в два-три раза при увеличении температуры на 100 °С. Возрастает интенсивность выветривания, фотосинтеза и гумификации, увеличивается активность почвенной биоты. Это находит отражение в вещественном составе почв. Так, увеличение температуры при идентичности прочих условий почвообразования приводит к возрастанию содержания глинистых частиц в почвенной массе (рис. 1). В соответствии с этим интенсивность процессов почвообразования в общем возрастает от полярного пояса к тропическому.

Влияние температуры на почвообразование проявляется и в других формах. Так, наличие в профиле почвы горизонта многолетней мерзлоты определяет ее своеобразный водный режим и специфический механизм миграции веществ по температурному градиенту.

Необходимым условием и важнейшим фактором почвообразования является вода. В почву вода поступает из трех источников, которыми являются атмосферные осадки, грунтовые воды, конденсированные пары воды. В условиях

Таблица 1

## Термические пояса земли

Пояс	Радиационный баланс, кДж/см <sup>2</sup> год	Пояс	Радиационный баланс, кДж/см <sup>2</sup> год	Пояс	Радиационный баланс, кДж/см <sup>2</sup> год
Полярный	0–42	Суббореальный	84–210	Тропический	252–336
Бореальный	42–84	Субтропический	210–252	Экваториальный	336–419

орошаемого земледелия к ним добавляются поливные и фильтрационные воды. В качестве наиболее общей закономерности распределения увлажненности в пределах земной поверхности следует отметить увеличение количества осадков от полюсов к экватору, однако эта закономерность проявляется значительно менее четко, чем в распределении тепла. Общепланетарная схема распределения осадков существенно осложняется разнообразными местными факторами – высотой местности над уровнем моря, конфигурацией горных сооружений, морскими течениями, циркуляцией воздушных масс. Примером могут служить расположенные на одной широте ландшафты влажных субтропиков Закавказья, где количество осадков превышает 2000 мм в год, и пустынь Средней Азии с годовым количеством осадков менее 100 мм.

Вода в почве необходима для поддержания жизнедеятельности населяющих ее организмов, в том числе для обеспечения фотосинтеза и транспирации. Вода является главным агентом миграции веществ в почвенном профиле, подавляющая часть которых передвигается в виде истинных и коллоидных растворов, а также в виде суспензий. Основная часть химических реакций, протекающих в почве, идет в жидкой среде (в почвенном растворе) или на границе раздела жидкой и твердой и жидкой и газообразной сред. Насыщенность почвы влагой определяет окислительно-восстановительную обстановку в почве. Повышенное увлажнение приводит обычно к формированию восстановительных условий в почве или отдельных ее горизонтах, инициируя процессы оглеения и торфонакопления. Вместе с атмосферными осадками в почву поступает большое количество различных веществ, в том числе техногенной природы, в частности, в результате выпадения так называемых “кислотных дождей”, представляющих собой слабые растворы серной и отчасти азотной кислот.

Очевидно, что обеспеченность почвы влагой зависит не только от количества выпадающих осадков, но и от теплообеспеченности почв, которая определяет расход воды на испарение и транспирацию. Поэтому влияние тепла и влаги необходимо рассматривать совместно. В наиболее общем виде совокупное влияние этих двух факторов позволяет оценить широко используемый в почвоведении коэффициент увлажнения, предложенный Г.Н. Высоцким и рассчитанный для различных ландшафтов Земли Н.Н. Ивановым, представляющий собой отношение количества атмосферных осадков к величине испаряемости за определенный период времени (обычно за месяц или за год).

Влагообеспеченность почв определяет их водный режим. В тех случаях, когда коэффициент увлажнения превышает единицу, в условиях хорошего дренажа в почве формируется промывной водный режим, при котором влага атмосферных осадков ежегодно проникает до грунтовых вод. Такой водный режим характерен для почв лесных ландшафтов, в частности, для подзоли-

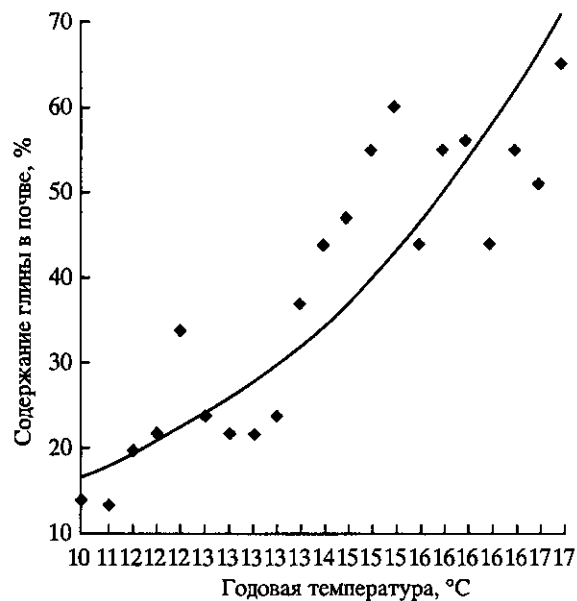


Рис. 2. Зависимость между содержанием глины и температуры почвы [Г. Иенни, 1948]

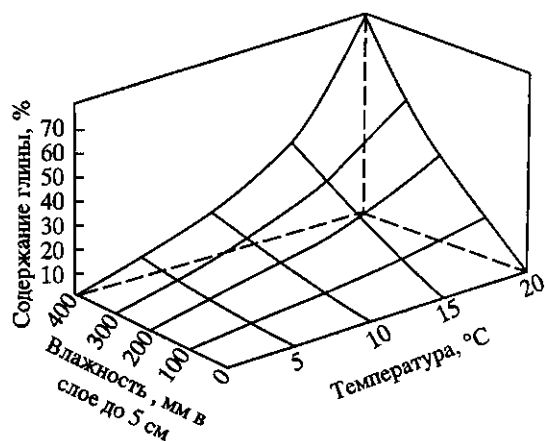


Рис. 3. Общая зависимость между содержанием глины и гидротермическими условиями [Г. Иенни, 1948]

стых почв и ферралитных почв влажных тропиков и субтропиков. Близкие к единице значения коэффициента характерны для серых лесных почв, оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов лесостепи, бурых лесных почв сухих и переменнo-влажных субтропиков, имеющих периодически промывной водный режим. Превышение испаряемости над осадками, определяющее значения коэффициента увлажнения меньше единицы и характерное для ландшафтов сухих степей, полупустынь, пустынь, обуславливает непромывной режим южных черноземов, каштановых, бурых полупустынных, серо-бурых пустынных почв.

Различия в водном балансе определяют общие различия в балансе почвообразования, что находит отражение в вещественном составе почв. Для подзоли-

стых и ферраллитных почв характерно отсутствие новообразований карбонатов и легкорастворимых солей; в черноземах лесостепи в профиле присутствуют карбонаты в виде псевдомицелия; в каштановых почвах появляются новообразования гипса, а в бурых полупустынных и серо-бурых пустынных почвах – легкорастворимые соли.

Гидротермические условия определяют интенсивность процессов почвообразования, что также отражается в вещественном составе почв. Увеличение теплообеспеченности при достаточной увлажненности проявляется в глубине трансформации минеральной массы почв. Наибольшая степень выветрелости первичных минералов характерна для ферраллитных и феррсиаллитных почв влажных тропиков и субтропиков, наименьшая – для почв полярных и аридных пустынь. Одним из проявлений совокупного влияния тепла и влаги является содержание глины, зависимость которой от гидротермических условий иллюстрируют рис. 2 и 3.

Гидротермические условия определяют характер трансформации и накопления органического вещества в почве. Гумусное состояние почв по Д.С. Орлову с соавт. [1996] является функцией продолжительности периода биологической активности (ПБА). Под ПБА понимаются период в течение года, когда в почве существуют благоприятные для нормальной вегетации растений и жизнедеятельности почвенной биоты условия, т.е. температура воздуха превышает 100 °С при достаточном запасе продуктивной влаги в почве. Существует четкая связь между гумусным состоянием почв и гидротермическими условиями, охарактеризованными через длительность ПБА (рис. 4).

Одной из важнейших особенностей климатических условий является их сезонная динамика. Она вызывает соответствующие изменения в течение почвообразовательного процесса. Сезонные изменения температуры и влажности почвы определяют динамику ее биологической активности; сезонной динамике подвержен состав почвенных растворов и характер миграции вещества в профиле почв и ландшафте; в течение года закономерно, вслед за изменениями гидротермических условий, меняются темпы и направленность процессов трансформации органического вещества. В частности, одно из условий интенсивного гумусонакопления в черноземах – контрастность гидротермического режима, способствующая закреплению новообразованных гумусовых кислот минеральной частью почвы [Самойлова и др., 1990]. По мнению некоторых исследователей [Дергачева, 1984; 1989; Самойлова и др., 1990], в почве имеет место сезонная динамика содержания и состава гумуса (рис. 5).

Почвообразование является биогенным процессом; возникновение и развитие почвы невозможно без участия живого вещества. Роль последнего в формировании почв сводится к трем группам функций. Первая заключается в том, что растительные и животные организмы являются поставщиками органического вещества, необходимого для образования почвенного гумуса. Вторая группа базируется на фундаментальном свойстве живого вещества – способности к избирательному поглощению элементов, одному из главных факторов изменения химического состава почвы по сравнению с исходной материнской породой. Третья группа функций – турбационная, перемешивание почв (роющая деятельность животных, корней, ветровалы).

Первичными продуцентами органического вещества являются растения. Их доля в биомассе суши Земного шара является абсолютно преобладающей, составляя 97–98%. Поэтому растениям принадлежит определяющая роль в обеспечении почвообразования органическим веществом. Характер гумусонакопления определяется количеством поступающих в почву растительных остатков, их

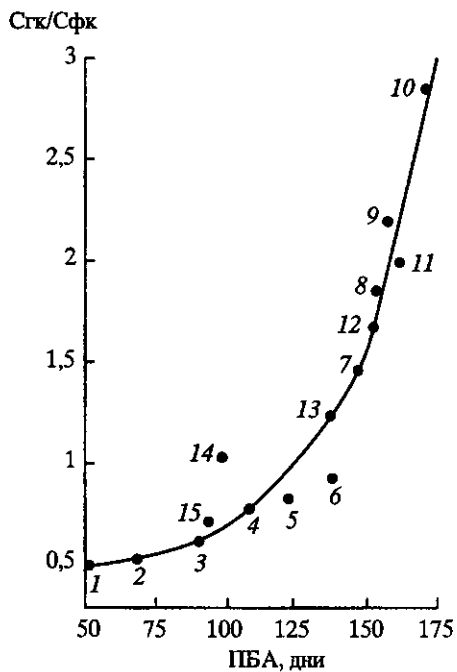


Рис. 4. Зависимость между типом гумуса и продолжительностью ПБА (Орлов и др., 1996).

1-15 - типы почв: 1 - тундровые; 2 - слабоподзолистые; 3 - подзолы; 4 - дерново-подзолистые; 5 - светло-серые; 6 - серые лесные; 7 - темно-серые; 8 - черноземы выщелоченные; 9 - черноземы типичные; 10 - черноземы обыкновенные; 11 - черноземы южные; 12 - темно-каштановые; 13 - каштановые; 14 - светло-каштановые; 15 - бурые полупустынные

Рис. 5. Изменение соотношения гуминовых кислот и фульвокислот в гумусовом горизонте дерново-подзолистой почвы (А) и обыкновенного чернозема (Б) в годичном цикле [Дергачева, 1969]

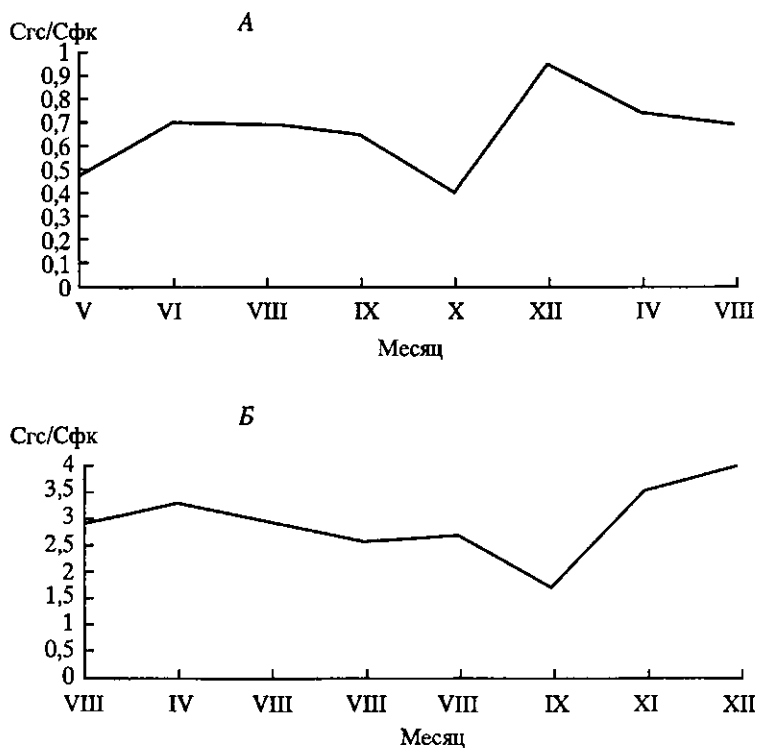


Таблица 2

## Показатели биологического круговорота в различных растительных сообществах

Растительное сообщество	Опад, т/га год	Доля подземных органов, %	Растительное сообщество	Опад, т/га год	Доля подземных органов, %
Арктическая тундра	9,5	70	Влажный тропический лес	27,5	19
Ельник-зеленомошник	5,9	25	Луговая степь	10,4	84
Липняк осоково-снытьевый	5,8	25	Мятликово-полынная пустыня	2,4	57

химическим составом и структурой фитомассы. Представление о количестве ежегодно попадающих в почву растительных остатков в различных природных экосистемах дает табл. 2.

Согласно кинетической теории гумификации, предложенной Д.С. Орловым [1977], глубина гумификации находится в функциональной зависимости от количества растительных остатков.

Следует иметь в виду, что органическое вещество растительных остатков, поступающее в почву, в значительной степени минерализуется и лишь меньшая его часть трансформируется по пути гумификации.

Помимо общего количества растительных остатков существенную роль в формировании органофила играет путь их поступления в почву. Часть растительных остатков поступает с наземным опадом, накапливаясь в виде подстилки – специфического поверхностного горизонта. В подстилке органическое вещество частично гумифицируется, затем поступает в гумусовый горизонт, где гумифицируется полностью и закрепляется минеральной частью почвы. Другая часть органического вещества поступает непосредственно в почву за счет отмирания подземных органов и трансформируется на месте. Соотношение между наземным и подземным поступлением растительных остатков определяет структура фитомассы. В травяных фитоценозах преобладает подземная ее часть (табл. 2), в лесных – надземная. В реальном органофиле распределение органического вещества может существенно осложняться процессами его миграции, перемешиванием почвенной массы животными, вывалами деревьев и другими процессами.

Процесс трансформации органических остатков зависит от химического состава опада. Высокое содержание легкорастворимых органических соединений и азота, в особенности на начальных стадиях распада, а также зольных элементов ускоряет разложение опада, в то время как обогащенность его лигнином, полифенолами, танинами тормозит этот процесс [Гришина и др. 1990].

Фундаментальным свойством живого вещества является его способность к избирательному поглощению элементов. Именно это лежит в основе производимой им глобальной геохимической работы, на огромные масштабы которой указывал В.И. Вернадский. Именно эта способность живого вещества и, в первую очередь растений, формирует химический состав почв, отличный от такового почвообразующей породы. Главнейшей особенностью химического состава почв является значительное содержание в них органического углерода и азо-

Таблица 3

**Коэффициент биологического поглощения элементов по отношению к кларкам литосферы (1) и почвы (2) [Карпачевский, 1993]**

Элемент	B	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Fe	S	Cd
Ax1	33,0	3,6	0,2	0,5	7,4	1,2	1,0	0,2	100,0	0,08
Ax2	40,0	11,0	0,2	0,5	88,0	2,5	2,2	0,3	60,0	0,02

та, полностью отсутствующих в породе (за редким исключением пород, исходно содержащих органическое вещество). Благодаря концентрированию растениями и микроорганизмами в почве накапливаются или задерживаются при промывном водном режиме и другие биофильные элементы – фосфор, сера, калий, кальций, магний и другие. Избирательность растений в поглощении элементов характеризует коэффициент биологического поглощения  $A_x$ , рассчитываемый как отношение содержания элемента X в золе растений к его содержанию в литосфере (кларку). Если значение коэффициента не превышает 0,7, то элемент практически не накапливается в растении; при значениях, лежащих в пределах 0,7–1,3, растение практически не влияет на распределение элемента в почве. В тех случаях, когда коэффициент  $A_x$  превышает единицу, имеет место избирательность растения к этому элементу, в результате чего возможно его накопление в почве благодаря поступлению опада [Карпачевский, 1993]. Иногда рассчитывают коэффициент биологического поглощения по отношению к конкретной почве или породе. Значения коэффициентов поглощения некоторых элементов приведены в табл. 3.

Помимо описанных выше главнейших функций растений в почвообразовании, они выполняют и ряд других, более частных функций. Растительный покров существенным образом регулирует микроклимат, что в особенности проявляется под пологом лесной растительности. Лес нивелирует колебания температуры. Кроны деревьев перехватывают атмосферные осадки, причем количество задержанной влаги может быть весьма велико и превышать 40% от общего их количества. Часть задержанных осадков стекает на почву с крон и по стволам, что изменяет её химический состав. Растительный покров формирует пространственную структуру почвенного покрова. Связь почвенных свойств с растительностью часто бывает теснее, чем с таксономической принадлежностью.

Биомасса животных составляет не более 2–3 % от общей биомассы суши Земли, что многократно меньше фитомассы. При этом масса беспозвоночных животных на два-три порядка превышает массу позвоночных. Роль животных в почвообразовании заключается главным образом в трансформации органического вещества и механическом перемешивании почвы. Почвенные животные производят первичную деструкцию органического вещества растительных остатков, что многократно увеличивает их удельную поверхность и делает их более доступными для микроорганизмов. Суммарный вес выделений, поставляемых животными в почву, в десятки и сотни раз превышает их собственный вес.

Чрезвычайно велика роль животных в педотурбационных процессах. Землерои (кроты, суслики, сурки) выбрасывают на поверхность почвы материал глубоких горизонтов. Так, в каштановых почвах на поверхность может быть вынесена почвенная масса, содержащая гипс. Если почва является солонцева-

той, то начинается процесс рассолонцевания, аналогичный тому, который имеет место при мелиоративном гипсовании солонцов. Роль почвенных животных проявляется при формировании органопрофиля почв. Именно благодаря деятельности почвенной фауны происходит перемешивание материала нижнего подгоризонта лесной подстилки с минеральной массой почвы, что является необходимым элементом гумусонакопления в почвах лесных экосистем. Ходы почвенных животных локально изменяют водный и воздушный режим почв.

Биологические и климатические факторы, воздействуя на верхние горизонты литосферы, превращают их в почву. Горная порода исходно является той матрицей, на которой образуется почва. Влияние породы на процессы почвообразования особенно велико на начальных его стадиях. Почва в большинстве случаев не менее чем на 90% состоит из минеральных компонентов, вещественный состав и сложение которых определяется особенностями почвообразующей породы. Иными словами, почва наследует многие черты почвообразующей породы. При этом порода определяет наиболее консервативные свойства почв, прежде всего такие, как их гранулометрический и минералогический состав. Механические свойства горных пород, их плотность, твердость, минералогический и химический состав определяют направление и интенсивность почвообразования. Формирование почвы на рыхлых породах идет значительно быстрее. Как правило, почвообразование интенсивнее протекает на основных породах, нежели на кислых.

В процессе почвообразования профиль почвы растет книзу, однако происходит и определенный рост почвы вверх за счет разрыхления почвообразующей породы и ее оструктуривания. Некоторые почвы (аллювиальные, вулканические) формируются в условиях постоянного аэрального (вулканический пепел) или аллювиального (пойменный или дельтовый аллювий) поступления материала на поверхность почвы, в результате чего профиль почвы растет вверх. В этом случае процесс почвообразования происходит синхронно с геологическим процессом осадконакопления. Многие исследователи считают, что аэральное накопление пыли вообще распространено весьма широко и его влияние на почвообразование может быть существенным.

Довольно часто бывает, что почва формируется на породах сложного генезиса, представленных несколькими литологическими слоями, имеющими различный химический и гранулометрический состав. Иногда почвообразование затушевывает различия между слоями, но чаще на основе различных слоев формируются генетические горизонты почв. Так, более легкие по гранулометрическому составу слои, подстилаемые слоями тяжелого гранулометрического состава, могут послужить основой образования подзолистого горизонта.

Почвенный покров Земли – п е д о с ф е р а – формируется на контакте трех других земных оболочек: литосферы, гидросферы и атмосферы. Являясь результатом их взаимодействия, почва сама оказывает на эти геосферы существенное влияние. Продукты почвообразования ускоряют химическое выветривание горных пород. Почвенная толща, обладая большей водоудерживающей способностью, способствует их физическому выветриванию. Этот процесс – разрушение подстилающих пород под влиянием сформированных на них почв – называют п е д о л и з о м [Карпачевский, 1993]. С другой стороны, почва оказывает защитное действие на литосферу, повышая ее устойчивость против денудационных процессов.



Почва является одним из ведущих факторов, определяющих состав атмосферы. Эмиссия из почвы диоксида углерода, оксидов азота, микрогазов (метана, сероводорода и других) играет важную, а по некоторым газам доминирующую роль в формировании состава атмосферы. Масштабы этих процессов не всегда пока ясны, а их значимость, видимо, еще не осознана и зачастую недооценивается. Почва может быть также резервуаром, стоком для диоксида углерода, превращая его в почвенные карбонаты.

Не менее важным представляется влияние почвенного покрова на гидросферу. Почвы проявляют себя как различные геохимические барьеры, регулируя водную миграцию веществ. Примером может служить гидрогенная аккумуляция соединений железа на окислительно-восстановительном геохимическом барьере в аллювиальных почвах пойм. Масштабы такой аккумуляции могут быть весьма велики и достигать нескольких тонн на гектар в год [Добровольский, 1968].

Почва принадлежит к особому классу природных систем, которые В.И. Вернадский назвал биокосными. Сущность биокосных систем заключается в том, что они представляют собой взаимодействующую совокупность живого и неживого (косного) вещества, при этом в результате их взаимодействия она приобретает свойства, которыми по отдельности ни живое, ни косное вещество не обладают. В природе существует множество биокосных систем разного уровня. К ним относится биосфера – самая крупная из них; к биокосным системам относятся биогеоценозы; биокосную природу имеют атмосфера, гидросфера.

Будучи одной из биокосных систем Земли, почва в то же время обладает специфическими чертами, отличающими ее от других систем такого рода. Почва как природное тело имеет ряд особенностей, делающих ее уникальным компонентом биосферы, не имеющим в ней аналогов.

Одним из свойств, общих для биокосных систем, является плодородие, т.е. способность поддерживать жизнедеятельность различных организмов и обеспечивать их продуктивность определенного уровня. Этим качеством, причем в наиболее полном его проявлении, наделена и почва. Более того, понятие плодородия долгое время использовалось применительно только к почве. Почва в состоянии поддерживать жизнедеятельность огромного числа организмов, разнообразие которых гораздо больше, чем в любой другой биокосной системе. Благодаря чрезвычайно высокой пространственной неоднородности на всех уровнях организации – от почвенного покрова Земли до структурных отделностей и элементарных почвенных частиц – почва представляет собой совокупность огромного количества экологических ниш, занимаемых самыми разнообразными организмами – от микроорганизмов и простейших до позвоночных животных и сосудистых растений. Никакая другая биокосная система Земли не в состоянии поддерживать жизнедеятельность растений и животных в таких масштабах – ни по видовому разнообразию, ни по биомассе.

Почва обладает специфическим строением, что также отличает ее от других биокосных систем. Главной особенностью строения почвы является дифференциация ее профиля на специфические генетические горизонты. Деление на горизонты – явление, широко распространенное в природе и свойственно также другим биокосным системам и даже не только им. Дифференциация на горизонты свойственна корам выветривания, илам, сапропелям и другим биокосным телам. Однако свита почвенных горизонтов образуется в результате специфиче-

ского процесса почвообразования и отличается рядом особенностей, отсутствующих в других биокосных системах.

Почвообразование сопряжено с биогеохимическими процессами, его обязательной составляющей является сложная трансформация органического вещества. Процесс гумификации с накоплением специфических органических соединений почвенного гумуса, образованием органо-минеральных соединений характерен для почв. Дифференциация почвы на горизонты представляет собой чрезвычайно сложный комплекс процессов биогенной, гидрогенной и иллювиальной аккумуляции, метаморфизации минеральной массы, элювиальных процессов. Это обуславливает весьма сложную дифференциацию вещества в пределах почвенного профиля в процессе почвообразования, не встречающуюся в других биокосных телах. Это находит отражение в строении почвенного профиля. Обязательным атрибутом профиля естественной ненарушенной почвы является поверхностный органогенный горизонт (подстилка, гумусовый, перегнойный, торфяной). Б.Б. Польшов считал необходимым внести эту особенность в определение почвы, указывая, что почва является свитой генетически связанных горизонтов с обязательным участием в ней поверхностного гумусированного горизонта.

Наряду со специфическими субстантивными чертами почва имеет ряд специфических функциональных особенностей. Являясь одним из компонентов биосферы, почва выполняет набор определенных функций. При этом необходимо подчеркнуть, что функции почвы в биосфере не могут быть выполнены никаким другим ее компонентом; в функциональном отношении почва также является уникальным незаменимым природным телом.

Функции почвы в биосфере весьма разнообразны. В наиболее общем виде они могут быть разделены на две большие группы. Суть функций первой группы заключается в том, что почва служит средой обитания и физической опорой огромному числу организмов. В почве в силу ее физических и химических особенностей создается уникальный комплекс условий по температуре, влажности, кислотности, окислительно-восстановительной обстановке, содержанию биофильных элементов, который не может быть воспроизведен ни в одной другой биокосной системе. Поэтому представители многих биологических видов могут обитать только в почве. Почва является необходимым и незаменимым субстратом, в котором растения укрепляются своими корнями и из которого черпают влагу и элементы минерального питания. Чрезвычайно высокое разнообразие почвенных условий на всех уровнях организации почвенного покрова обуславливает формирование в почве огромного количества разных типов местообитаний, что определяет соответствующее разнообразие организмов, обитающих в почве. Именно поэтому очень велика роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия.

Другая группа функций почвы в биосфере базируется на том, что почва является необходимым звеном и регулятором круговорота элементов в биосфере или, как их называют, биогеохимических циклов. Потоки всех элементов в биосфере проходят через почву, которая посредством специфических механизмов регулирует их направленность и интенсивность. Так, почва является важнейшим звеном в биогеохимическом цикле углерода. В результате процесса гумусообразования в почве консервируются большие запасы этого элемента в виде специфических гумусовых веществ. С другой стороны, почва за счет постоянно протекающей в ней минерализации растительных остатков и частичного окисления гумуса служит источником эмиссии диоксида углерода в атмосферу, кон-

тролируя тем самым в определенной степени ее газовый состав. Изменение гумусного состояния почв, в частности, антропогенная их дегумификация, приводит к нарушению биогеохимического цикла углерода и возрастанию эмиссии углекислого газа в атмосферу. Велика роль почвы в формировании биогеохимического цикла азота прежде всего за счет его биологической фиксации почвенными микроорганизмами. Подобное регулирующее действие почва оказывает на все биогеохимические циклы. Эта глобальная функциональная особенность почвы очень удачно была подчеркнута Б.Г. Розановым в образном определении почвы термином “геомембрана”.

Незаменимость почвы в выполнении биосферных функций определяет ее роль в поддержании жизни на Земле. Будучи компонентом биосферы, почва в то же время является необходимым условием ее существования. Являясь продуктом преобразования литосферы под воздействием живого вещества, почва сама представляет необходимое условие существования жизни на Земле. Своеобразие почв как природного тела приводит также к многоуровневой морфологической организации почв, в конечном итоге воплощенных в организации почвенного профиля и почвенного покрова.

## *Глава 2*

### **МОРФОЛОГИЯ И МОРФОГЕНЕЗ ПОЧВ**

Генезис почв приводит к созданию набора морфологических свойств, оригинального профиля почвы. Специфичность почв прежде всего проявляется в их строении, морфологических свойствах. Именно макро- и микростроение почв – первая основа формирования экологических ниш биосферы, приводящая к биологическому разнообразию биосферы и экологическому функционированию самих почв. Почвы отличаются от почвообразующих пород в первую очередь своей структурой и гумусированностью хотя бы самого верхнего слоя. Структура почвы отличается на всех уровнях: на молекулярном – изменение минералов почвообразующих пород, включая изоморфные замещения, появление новых молекул как органических, так и неорганических соединений, формирование специфических для почв агрегатов (часто, как в случае черноземов и серых лесных почв – главного различия почв), превращение изотропной геологической породы в анизотропную почву, у которой по вертикальной оси формируются генетические горизонты, а по горизонтальной – чередуются разные морфоны. Строение почв сопряжено с другими их свойствами: химическими и физическими, которые все вместе позволяют классифицировать почвы, разделив континуум почв на дискретные объемы: зоны, провинции, районы, типы, роды и пр. Такое деление может лежать в основе классификации почв по характеру и выраженности их экологических функций. Классификация почв, построенная на докучаевских принципах, позволяет оценить экологические функции почв и их варьирование в зависимости от типа почвы.

В процессе почвообразования в профилях почв, в их строении и структурных элементах запечатляются результаты многих разнокачественных элементарных процессов. Воздействие факторов внешней среды на горную породу приводит к формированию и накоплению наиболее устойчивых и консервативных почвенных признаков, характерных для определенных условий почвообра-

зования. Эти разнокачественные признаки в виде морфологических элементов разного вещественного состава закономерно локализованы на разных глубинах почвенного профиля (до двух и более метров), и они позволяют выделить самостоятельные генетические горизонты. Еще В.В. Докучаев наглядно проиллюстрировал, что горизонты существуют не как изолированные “слои”, подобно пластам геологических пород, а сопряжены и находятся между собой в генетической связи. Положение о единстве почвенного профиля и взаимообусловленности его генетических горизонтов и элементов строения является методологической основой докучаевского почвоведения.

Профильный метод исследования почв, предложенный В.В. Докучаевым, повсеместно принят почвоведцами, как наиболее рациональный и информативный метод в практике полевого изучения почв. Профиль почвы подразумевает его целостность с одной стороны и разнокачественность генетических горизонтов с другой. Эта разнокачественность формируется под воздействием сочетания факторов внешней среды на горную породу. Последняя также характеризуется широким разнообразием, которое объединяется в литолого-геоморфологический фактор почвообразования.

Анализ почвенного профиля базируется на концепции генетических горизонтов. Выделенная В.В. Докучаевым система горизонтов А–В–С (первоначально применительно к почвам степных ландшафтов) внедрена и дополнена в национальных номенклатурах почвенных горизонтов многих стран мира. Гумусово-аккумулятивные горизонты (А) имеют много общих черт во всех почвах природных зон – это зона синтеза, аккумуляции и трансформации органических компонентов. Эти горизонты различаются главным образом по степени насыщенности основаниями и карбонатности. Переходные горизонты (В) несут чаще признаки иллювиального накопления глинистого вещества и карбонатов.

Система горизонтов почвенного профиля сформирована под воздействием факторов внешней среды на фоне природной вертикальной анизотропности почв. Ведущими факторами в дифференциации профиля на генетические горизонты являются: 1) вертикальная ярусность корневых систем растений; 2) вертикальное распределение микроорганизмов; 3) вертикальное распределение и миграция почвообитающих животных; 5) вертикальная диффузия газов из атмосферы в почву и эманация газов из внутренних слоев земли к поверхности [Розанов, 1983].

Анизотропный характер воздействия разнокачественных факторов внешней среды на горную породу сформировал разнообразие генетических типов почв мира. Среди них в свою очередь выделяются главнейшие типы строения почвенного профиля, соответствующие основным природным зонам и сочетанию соответствующих элементарных почвенных процессов: подзолистый, гумусовый-недифференцированный, гумусово-глеевый, гумусово-карбонатный, буроземный, солонцовый, красноземный. Эти типы строения почвенного профиля в какой-то степени соответствуют и типу почвообразования, характерному для определенной биоклиматической обстановки.

Генетические типы строения почвенных профилей, как определенные сочетания генетических горизонтов, специфичные для каждого типа почвообразования различаются по характеру соотношения генетических горизонтов. Первая группа профилей (простые или нормальные) объединяет почвы всех этапов эволюционного развития на разных почвообразующих породах, от примитивных – до полноразвитых (зональных). Вторая группа сложных профилей объединяет почвы с реликтовым, многочленным, полициклическим и нарушенным

профилем. Эти почвы в своем развитии чаще подвергались экзогенным воздействиям (эрозии и отложению материала, резким сменам климатических условий и характера осадконакопления).

Профиль почвы, ее таксономическая принадлежность определяется диагностическим (генетическим) горизонтом или сочетанием нескольких горизонтов. Выделяются ведущие типы генетических горизонтов [Розанов, 1983]: *органо-генные*, состоящие как из органических, так и смеси органических и минеральных компонентов; *элювиальные-оподзоленные*, *элювиально-глеевые*, *осолоделые*; *иллювиальные*, различаются по характеру иллювируемого материала; *метаморфические* горизонты внутрпочвенного оглинивания – различаются по степени оглинивания, и минералогии глинистого вещества; *гидрогенно-аккумулятивные*, формируются в почвах гидроморфных ландшафтов; *коровые* характерны для аридных и некоторых тропических почв; *глеевые* имеют широкое разнообразие в переувлажненных и гидроморфных почвах; *турбационные*, образуются мерзлотными, зоогенными и другими воздействиями.

Генетические типы профилей выделяются не только по соотношению генетических горизонтов, но и по характеру распределения основных почвенных компонентов по профилю, что отражается в морфологических признаках и аналитических характеристиках. Такими компонентами являются гумус, карбонаты, илестые частицы, соли, полуторные оксиды и кремнезем. Выделяются пять ведущих типов распределения веществ в почвенном профиле: *аккумулятивный*, *элювиальный*, *грунтово-аккумулятивный*, *элювиально-иллювиальный* и *недифференцированный*.

Ранее отмечалось, что "...строение почвы представляет результат ее генезиса, постепенного развития ее из материнской породы, которая дифференцируется на горизонты в процессе почвообразования". В то же время – "Морфологические признаки в их совокупности позволяют также определить природу данного почвенного образования и отнести его к определенному типу, группе и разновидности, другими словами, поместить на определенное место в классификационной системе" [Захаров, 1931]. В этих словах С.А. Захарова сконцентрированы принципы морфогенеза почв, которые в дальнейшем нашли свое отражение как в генетических, так и прикладных почвенных исследованиях и классификациях.

Профиль почвы и его многочисленные морфологические элементы являются основой для морфогенетического анализа происхождения и развития почвы, реконструкции условий почвообразования и условий развития ландшафта. Этот методологический подход находит широкое применение в палеопочвенных и палеоландшафтных исследованиях и археологии.

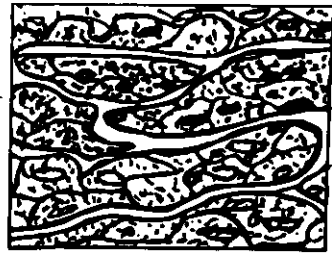
### **Принципы морфогенетических исследований почв**

Основой морфогенетических исследований почв является поэтапное изучение усложняющихся условий структурной организации почвенной массы, от наиболее простого элемента к совокупности разных элементов. Система структурных уровней организации почвенной массы характеризуется главной особенностью – иерархической соподчиненностью отдельных элементов, объектов (рис. 6).

Каждый высокий уровень включает элементы более низких уровней, однако это объединение не механическое, новый уровень приобретает новые функциональные свойства и характеризуется другими взаимодействиями в почвен-



профиль



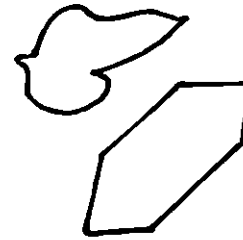
горизонт



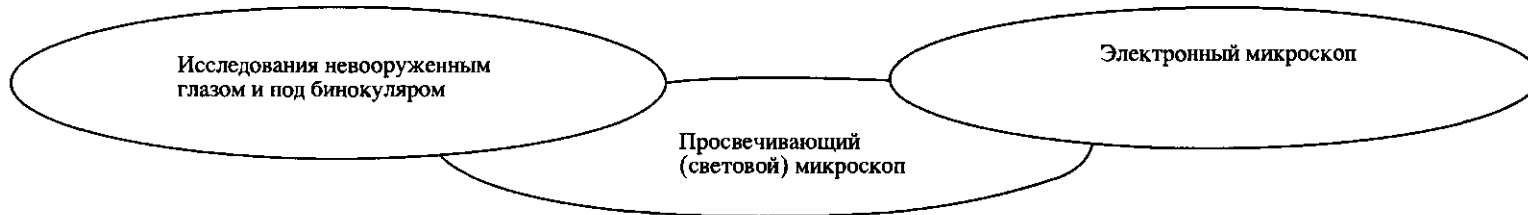
агрегаты



первичные материалы



вторичные материалы



0	1	2	3	4	5
---	---	---	---	---	---

увеличение ( $10^x$ )

ном профиле [Воронин, 1979; Розанов, 1983]. Представление о структурных уровнях базируется на основе взаимоотношений составляющих элементов почвенной массы. На самых низких уровнях такими элементами являются элементарные (индивидуальные) почвенные частицы, включающие в себя как минеральные частицы первичных и вторичных минералов, так и их сростки и органо-минеральные комплексы.

Более низкие уровни – атомарный и молекулярный являются составляющими этих структурных элементов. Между элементарными частицами в почве в ее воздушной и водной микросферах протекают различные молекулярно-ионные взаимодействия, перемещения ионов и катионов, процессы растворения, преобразования и синтеза минеральных, органических и органо-минеральных соединений. Отдельные молекулы могут впоследствии формировать элементарные почвенные частицы – кристаллы солей, глобулы оксидов железа и т.д.

Индивидуальные почвенные частицы обладают разной дисперсностью, морфологией, минералогическим, химическим составом и физическими свойствами. Эти частицы являются теми наименьшими “кирпичиками”, с которых начинается структурная организация почвенной массы, строение профиля, и они составляют ее основу. Свойства элементарных почвенных частиц как наиболее подвижных и активных компонентов, определяющих многие физические и химические свойства почвы, играют особую роль в формировании морфологического строения почвенного профиля. Так, с ними связана поглотительная способность, набухаемость, способность к агрегированию. Однако физические и физико-химические свойства почв зависят не только от общего содержания глинистого компонента, но и от его качественного состава (минералогии), дисперсности, насыщенности катионами и характера микростроения (взаимного расположения частиц).

Минералогический состав и разная дисперсность частиц, различие по адсорбционной способности базальных граней по сравнению с углами, ребрами и сколами кристаллов влияют на адсорбцию влаги и неодинаковое отношение к катионам и определяют форму, размер и взаимное расположение агрегатов глинистых частиц. Таким образом вещественный состав и исходное микростроение глинистых компонентов определяют набухание-усадку суглинисто-глинистых почв, водопроницаемость и капиллярное поднятие воды в них, размываемость и механические свойства и т.д.

В почвах и рыхлых осадочных отложениях глинистые частицы находятся не в форме разобренных индивидуальных кристаллов, а формируют преимущественно агрегаты, отличающиеся размерами и формой. В таких агрегатах глинистые частицы соориентированы между собой по типу базис–базис в результате дипольных (кулоновских) взаимодействий и сложение между частицами происходит по типу черепичной крыши. Такой агрегат называется псевдокристаллом, чешуйкой или доменом. Некоторые чешуйки могут содержать в качестве примеси гидроксиды железа и алюминия, органические компоненты; и не исключена возможность присутствия в них высокодисперсных зерен первичных минералов. Наличие примесей препятствует аксиальному сочленению частиц и способствует округлости глинистых агрегатов. Размеры чешуек колеблются в больших пределах – от 0,5 до 20 мкм, но в большинстве случаев их диаметр составляет 3–8 мкм, а толщина 1–4 мкм. Глинистая чешуйка – тот элемент, который создает общее микростроение суглинистых и глинистых почв [Добровольский, Шоба, 1978].

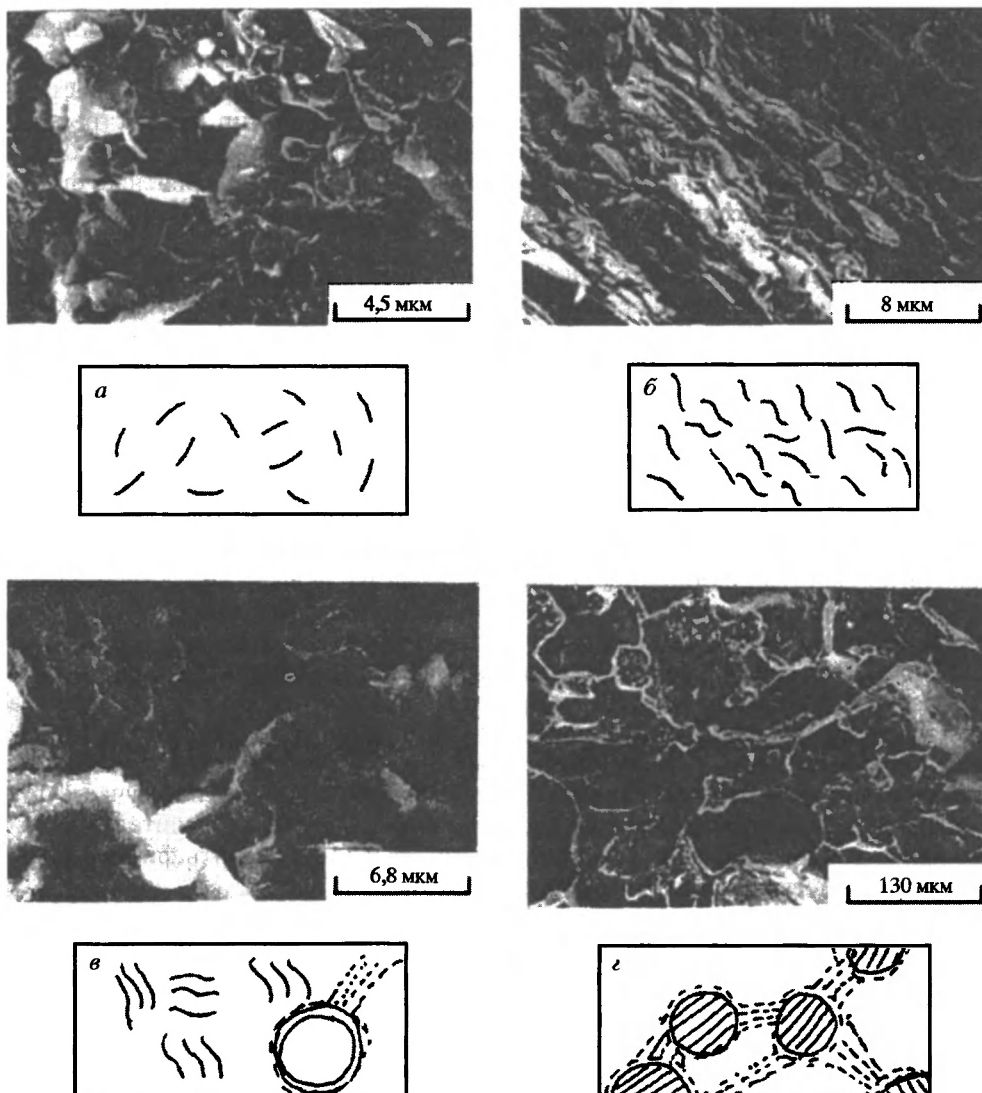


Рис. 7. Типы микростроения глинистого вещества почв: а – чешуйчатый, б – ламинарный, в – матричный, г – пленочный

Анализ микростроения глинистого вещества почв, сформированных на разных почвообразующих породах, на основе сравнения электронно-микроскопических фотографий образцов ненарушенного сложения и фотографий шлифов позволили выделить базовые типы: *чешуйчатый*, (*чешуйчато*)-*турбулентный*, *вокругагрегатный* (*пленочный*), *матричный*. Рассматриваемые типы строений различаются по характеру взаимного расположения агрегатов глинистых частиц и по отношению к более крупным зернам первичных минералов.

Чешуйчатый тип характеризуется изометричной и слабоудлиненной формой глинистых агрегатов, беспорядочно соориентированных между собой, рыхлой упаковкой и высокой микропористостью и преобладает в лессо-



видных и покровных отложениях (рис. 7). Субстраты с чешуйчато-турбулентным типом микростроения глинистого вещества имеют компактное сложение, агрегаты имеют согласованную субпараллельную ориентацию частиц, разъединены узкими щелевидными порами. Подобный тип микростроения характерен для озерных, озерно-ледниковых и некоторых аллювиальных отложений. Соответственно, данные субстраты имеют неблагоприятные физические свойства: высокую набухаемость и усадку, низкую водопроницаемость и структурность.

Вокругскелетный тип строения представляет собой рыхло упакованный скелет зерен первичных минералов и обломков пород, поверхности которых покрыты сплошной или прерывистой глинистой пленкой. На контактах частиц часто находятся глинистые мостики. Поровое пространство представлено межчастичными сообщающимися пустотами, которые соразмерны с зернами скелета. Данный тип строения характерен для супесчаных и песчаных субстратов водно-ледникового генезиса.

Матричный тип строения представлен нечетко агрегированным глинистым материалом с широким диапазоном размеров чешуек (1–10 мкм). Последние имеют слабую взаимную ориентацию, сопряженность проявляется микроскопически. Глинистые частицы формируют пленки на зернах скелета и мостики между ними. В целом данный тип строения имеет компактное сложение и характерен для некоторых моренных и покровных отложений.

Субстраты, состоящие из зерен первичных минералов пылеватых и песчаных размеров, консолидируются по принципу простой упаковки зерен. На контактах между частицами иногда присутствуют в небольших количествах глинистые минералы, оксиды полуторных элементов и органические соединения. В силу малой удельной поверхности они не набухают и крайне слабо участвуют в формировании поглотительных свойств почвы. Однако незначительное содержание тонкодисперсных компонентов может резко изменить физико-механические свойства рассматриваемых субстратов.

Особенно огромная значимость этого уровня в понимании и осуществлении прогнозирования воздействий инженерно-мелиоративных мероприятий на почвы. Ведь разнокачественные субстраты будут вести себя по-разному после антропогенного воздействия, и “скорость” трансформированности этих субстратов также будет различной.

Так, орошаемые почвы на лессах и лессовидных отложениях с “рыхлой” упаковкой элементарных частиц проявляют хорошие фильтрационные свойства и, в то же время, после усыхания могут подвергаться усадке. Мелиорируемые тяжелые почвы на озерно-ледниковых отложениях с компактной упаковкой частиц очень трудно поддаются антропогенному окультуриванию в силу слабой исходной “агрегационной” способности субстрата и его низких фильтрационных свойств.

Субмикроморфологический уровень наглядно проиллюстрировал разный тип микростроений суглинисто-глинистых субстратов. Их влияние проявляется в структурной организации почвенных профилей, размерах и форме структурных отдельностей по генетическим горизонтам, а также характере, интенсивности и глубине проявления трещинной сети в профилях почв.

С развитостью структуры и трещинной сети иллювиальных горизонтов почв с промывным типом водного режима коррелирует проявление иллювиального процесса, интенсивность и глубина проникновения глинистых частиц из верхних горизонтов. Интенсивность иллювирования тесно связана с дренированностью профиля. В свою очередь дренированность обеспечивается хорошо

развитой и устойчивой трещинной сетью, позволяющей мигрировать по профилю почвенным растворам и суспензиям.

Агрегатный уровень организации почвенной массы несет в себе отпечатки почвообразовательного процесса. Агрегатный уровень, агрегатное состояние служат критерием физического, физико-химического и биологического состояния почвенного горизонта. Неоднородность по строению и свойствам внутренних и периферийных частей агрегатов предопределяет протекание в этих локусах разнокачественных процессов: обмена и миграции веществ, микробиологической деятельности и т.д. Так как агрегаты по своей природе являются дискретным образованием, то они легко поддаются количественному учету и характеристике.

Агрегаты формируют горизонт, с него начинается генетическая диагностика почв и он служит основой для характеристики и определения почвы. Докучаевское понятие о почвенном горизонте, приведенное ранее, вошло в науку о почве в качестве фундаментального постулата. Генетический горизонт почвенного профиля – объект всестороннего изучения его морфологии, состава и генезиса.

Уровень почвенного профиля заканчивает сложную иерархическую соподчиненность генетических горизонтов, почвенных агрегатов и элементарных почвенных частиц. В профиле почвы заложено целостное материальное тело, характеризующееся тремя измерениями. Разнообразие профилей почв является следствием разнообразия факторов почвообразования.

### **Влияние микростроения глинистого вещества на морфологию и некоторые свойства почв**

Существует тесная связь между набуханием и усадкой глинистых пород и характером их микростроения, с одной стороны, и особенностями формирования и функционирования трещин, – с другой. Субстраты с простыми типами строения глинистой плазмы (чешуйчатый, чешуйчато-волокнистый), где ориентация доменов беспорядочная или частично упорядоченная, имеют преимущественно коагуляционные контакты. Отличительная особенность пород с такими контактами – слабая или средняя набухаемость, иногда они вообще не набухают. При увлажнении расклинивающее действие пленок воды приложено к небольшим поверхностям и давление набухания преобразовывается в противоположные силы реакции (вследствие давления вышележащей толщи), которые реализуются в изменении взаиморасположения частиц. В высокопористых средах глинистые агрегаты лишь временно меняют взаимную ориентацию, так как коагуляционные контакты обладают свойством обратимости, т.е. способностью восстанавливать свою структуру при последовательных увлажнении–иссушениях (рис. 8).

При иссушении в результате дегидратации происходит незначительное уменьшение исходного объема почвенной массы, которое обуславливает напряжение, приводящее к формированию трещин. Последующие циклы увлажнения и иссушения не приводят к уплотнению притрещинной массы до такой степени, чтобы здесь появились связи более сильные чем во внутриводной массе. Поэтому в таких породах трещины устойчивы, они постоянно функционируют и главное – развиваются. В почвах на этих породах наблюдается четкая дифференциация в количестве, морфологии и функциональных характеристиках трещин по генетическим горизонтам. Магистральные трещины довольно часто проникают на глубину двух–трех и более метров.

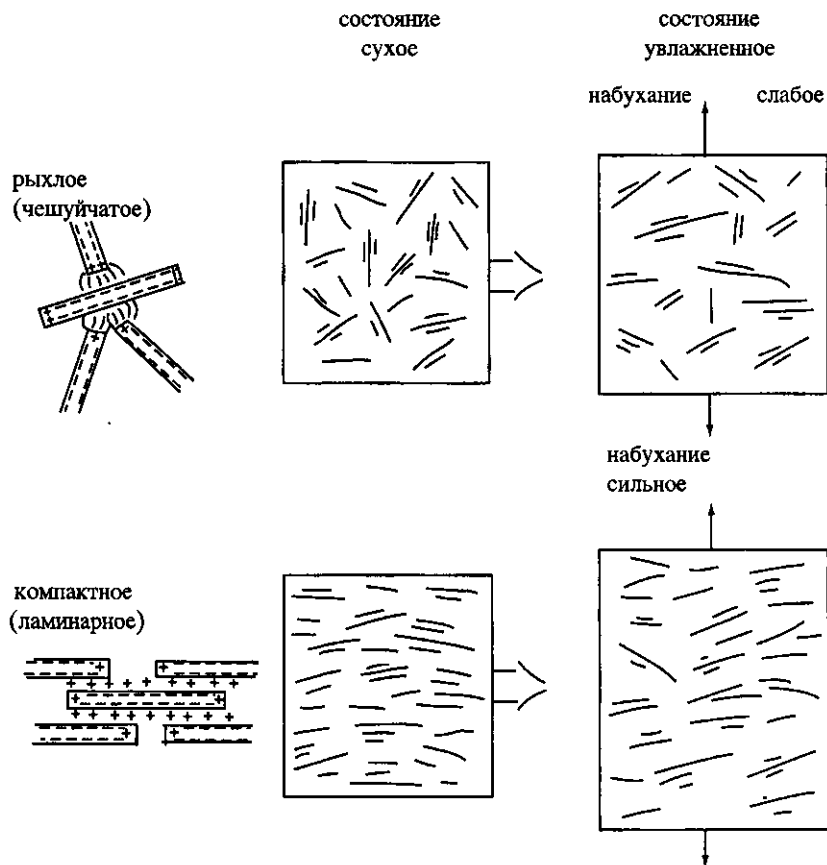


Рис. 8. Взаимосвязь микростроения глинистого вещества и набухания тонкодисперсных систем

Наличие стабильно функционирующей трещинной сети обеспечивает регулярность проявления процессов иллювирирования суспензий, накоплению глинистых натеков в иллювиальных горизонтах и их последующей сохранности. Существует отчетливая корреляция между типом микростроения глинистого вещества и характером трещинной сети профиля с одной стороны и профилем иллювирирования (количество натеков, глубина максимума накопления) – с другой. В субстратах с простыми типами микростроения глинистого вещества иллювирирование проявляется наиболее ярко и глубина максимального накопления суспензий наибольшая (рис. 9).

Существенно отличная картина характерна для почв, формирующихся на тяжелых субстратах со сложными типами микростроения глинистого вещества. Трещинная сеть в почвах на таких породах развита слабо, она непостоянна и плохо функционирует.

В сформированные после иссушения материала трещины проникает некоторое количество иллювирированного глинистого вещества. При последующем цикле увлажнения–усыхания происходит быстрое набухание внутритрещинной и притрещинной массы, что приводит к быстрому смыканию трещины. Давление набухания приводит к переориентации глинистых частиц вдоль трещины и иллювирированный материал внедряется в основу. В этом случае давление приводит к переориентации глинистых частиц в притрещинной зоне

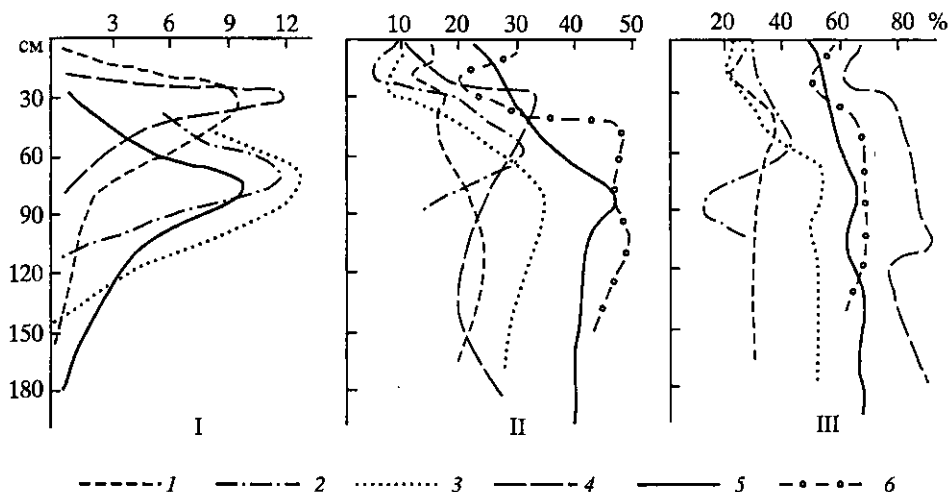


Рис. 9. Профильное распределение глинистых натеков I, ила II, и физической глины III в дерново-подзолистых почвах на суглинисто-глинистых отложениях

1 – моренный карбонатный суглинок, Валдай; 2, 3 – сингенетичные сортированные моренный и покровный суглинки (Московская обл.); 4 – озерно-ледниковая глина (Новгородская обл.); 5 – лессовидная глина (Томская обл.); 6 – пермская красноцветная глина (Пермская обл.)

по типу базис–базис и после высыхания эти участки трещины могут иметь большее сцепление между глинистыми частицами и прочность на разрыв, чем внутрипедная масса. Поэтому новая трещина образуется в новом месте. Такие многократные циклы увлажнения–усыхания являются важным фактором локальной педотурбации почвенного материала иллювиальных горизонтов. В этих условиях трещины плохо функционируют, обуславливая тем самым низкую водопроницаемость горизонта и застой влаги. Поэтому в этих почвах максимум иллювирувания находится неглубоко (в горизонтах A2B–B1 на глубинах 30–50 см), а внутрипедная масса содержит много обломков глинистых натеков.

Характер микростроения глинистого вещества основных типов пород суглинисто-глинистого состава имеет определенную корреляцию не только с проявлением трещинной сети, но и степенью текстурной дифференциации профилей почв, формирующихся в автономных позициях в сходных биоклиматических обстановках. Это проявляется в отчетливой разноразличности морфологического строения профилей почв, характере проявления и мощности генетических горизонтов. Эту закономерность подтверждают аналитические данные (гранулометрический и валовый состав почв) и микроморфологические подсчеты содержания глинистых кулан по генетическим горизонтам. Особенно ярко различия проявляются в мощности и глубине залегания иллювиальных горизонтов.

Текстурная дифференциация профилей и проявления иллювирувания в дерново-подзолистых почвах уменьшается в ряде почв, сформированных на лессовидных глинах – покровных суглинках – моренных суглинках – озерно-ледниковых и пермских красноцветных отложениях. Из всех рассматриваемых объектов как более отчетливая текстурная дифференциация характерна для дерново-подзолистых почв на лессовидных тяжелых суглинках и глинах (Западная Сибирь). Эта особенность неоднократно отмечалась многими авто-

рами [Корсунов, 1974; Ковалев и др., 1981], которые отнесли рассматриваемые почвы к глубокоподзолистым не только по наличию мощного осветленного горизонта, но и четко выраженному глубоко залегающему иллювиальному горизонту (рис. 9). Профильное распределение глинистых кутан обнаруживает их явный максимум в горизонте В2 на глубине 70–90 см. Они покрывают все грани структурных отдельностей и заполняют тонкие поры. Для этих почв характерно максимальное соответствие расчетных балансов илистой фракции, накапливаемой в иллювиальных горизонтах по сравнению с почвообразующей породой как по данным гранулометрии, так и по содержанию глинистых кутан.

Текстурная дифференциация и интенсивность иллювиирования в почвах на озерных отложениях слабо выражена. Это во многом связано со слоистостью почвообразующей породы, слабо развитой трещинной сетью и компактным ламинарно-турбулентным микростроением глинистого вещества. Профиль иллювиирования укорочен, почти отсутствуют обломки глинистых натеков в переходных горизонтах (они быстро ассимилируются с глинистой внутриведной массой).

Схожа выраженность текстурной дифференциации и профильное распределение глинистых кутан в дерново-подзолистых почвах на глинистом элювии красноцветных пермских отложений (рис. 9). Максимальное содержание иллювиированных глинистых натеков приурочено к горизонтам А2В и меньше – В1. В этих горизонтах также преобладает чешуйчато-турбулентный тип микростроения глинистого вещества с низкой межчастичной пористостью.

В дерново-подзолистых почвах на покровных суглинках отмечается высокая степень текстурной дифференциации профиля, развитая трещинная сеть, интенсивные процессы иллювиирования. Этому способствует чешуйчатый и чешуйчато-волоконистый тип микростроения глинистого вещества осадков, приводящий к максимальному проявлению отмеченных выше явлений.

В почвах на моренных суглинках, по сравнению с аналогичными на покровных, текстурная дифференциация проявляется менее ярко. Этому способствуют слабая “сортированность” субстрата и преобладание матричного типа микростроения глинистого вещества: чередование микрозон глинистого материала с компактным и согласованным сложением агрегатов глинистых частиц и зон из грубодисперсных частиц первичных минералов. Неравномерное пространственное распределение илистых и грубообломочных частиц, разная степень “микроагрегированности” глинистой плазмы обуславливают неоднородность набухания и усадки субстрата. Это в свою очередь приводит к формированию нечеткой и плохо функционирующей трещинной сети.

### Глава 3

## РАЗНООБРАЗИЕ ПОЧВ НА ЗЕМЛЕ КАК СЛЕДСТВИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ФАКТОРОВ И УСЛОВИЙ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ

Мир почв, подобно остальным природным телам, весьма разнообразен. Это разнообразие есть прямое следствие неоднородности географической среды на Земном шаре. Поскольку почва, по Докучаеву, есть функция пяти основных факторов почвообразования (климата, горных пород, организмов, рельефа местности и возраста страны (времени)), то вполне очевидно, что даже, если рассматривать факторы как независимые переменные, каждая из которых имеет определенные значения, то число сочетаний, образуемых этими значениями, может быть очень велико. Сочетания факторов почвообразования предопределяют конкретные экологические условия развития почвообразовательного процесса и почв.

Понятие “фактор почвообразования” – комплексное. Нельзя, например, определить климат через какое-либо одно значение или величину. Полное определение состояния каждого из факторов для описания почвообразования в каждом конкретном случае осуществляется путем выявления многих параметров. В почвоведении при системном описании факторов почвообразования стремятся учитывать те параметры каждого из факторов, которые могут предопределить отличительные признаки разных почв. При так называемом полном “факторном” описании или в процессе “факторной диагностики” почв можно выделить несколько сотен и даже тысяч параметров, используемых для описания факторов почвообразования. Так, для климата выделяют параметры, характеризующие общий климат зоны, провинции, микроклиматические характеристики, отличающиеся от общего макроклиматического фона местности.

Не менее сложен полный учет всех параметров и условий, определяющих действие таких факторов почвообразования как горные породы и рельеф. Здесь важны химический, минералогический и петрографический состав горных пород, характер их сложения; формы макро- и микрорельефа, крутизна и экспозиция склонов и многое-многое другое.

Таким образом, теоретически возможное число сочетаний из всех возможных значений разнообразных параметров и условий почвообразования бесконечно велико. В действительности же далеко не все теоретически возможные сочетания реализуются в природе Земли. Факторы почвообразования сложным образом взаимодействуют друг с другом, создавая многообразие локальных условий почвообразования при относительном постоянстве “макрофакторов”.

Так, в условиях холодного гумидного климата значительное влияние на характер почвообразования оказывает повышенная увлажненность, вследствие чего почвенный покров очень чутко реагирует на изменение условий увлажнения. Поэтому даже при относительном постоянстве климатических условий, характера почвообразующих пород, микрорельефа и возраста территории почвенный покров будет сильно варьировать в зависимости от форм мезо- и микрорельефа, образуя на дренируемых участках склонов и микроповышениях значительно менее гидроморфные почвенные таксоны, чем на остальной территории. Эти условия четко отражаются на свойствах органической и минеральной частей почв, на их морфологическом облике, предопределяет их функции в биогеоценозе. В лесостепной зоне, где нет избытка влаги, эта закономерность выражена не столь

ярко, поэтому почвенный покров там более однороден. Значение влажности как лимитирующего фактора вновь возрастает в сухостепной и пустынной зоне, где сказывается, напротив, недостаток влаги, и поэтому растительность, а вслед за ней и почвы, реагируют на изменение форм микрорельефа, перераспределяющего атмосферную влагу. Аналогичные примеры можно привести и в отношении других факторов. Так, многообразие почв, и, следовательно, сложность почвенного покрова, может быть образована пестротой почвообразующих пород, которая может обуславливать различие в водно-физических свойствах почвы.

Из приведенных примеров видно, что разнообразие почв вовсе не соответствует числу сочетаний из факторов и условий почвообразования. В мире почв в основном встречаются своего рода устойчивые, так называемые “центральные” образы, тогда как отклонения от них могут быть описаны как разнообразные “переходные” варианты. Это и обуславливает возможность научного описания и подхода к изучению разнообразия почв.

Закономерности распределения почв на Земном шаре являются основой научной систематики почв и составления почвенных классификаций. Следует отметить, что проблема классификации является одной из наиболее сложных теоретических проблем большинства естественных наук. В полной мере это относится и к почвоведению. Более того, разработка классификации почв особенно трудна в связи со специфическими чертами генезиса, состава и свойств почв как совершенно особых природных тел. Среди этих особенностей выделяются прежде всего следующие:

- биокосный (органо-минеральный) состав почв, формирующихся в результате взаимодействия живых организмов, их метаболитов и минеральной основы почвообразующей горной породы,

- широкая суточная, сезонная, годовая и вековая динамика почвенных процессов и свойств почв,

- высокая пространственная (по горизонтали) вариабельность измеряемых почвенных свойств,

- пространственная непрерывность почвенного покрова, отсутствие четких границ между разновидностями почв, множество переходных форм, отсутствие в природе дискретного почвенного тела;

- длительность эволюции природных почв, ведущая к сочетанию современных и реликтовых признаков в почвенном профиле;

- воздействие производственной деятельности человека на природный почвенный покров и формирование в разной степени антропогенно измененных почв;

- неоднозначность реакций почв на антропогенные воздействия в связи с разнообразием условий, видов и технологий землепользования,

- стремление человека в истории его хозяйственной деятельности уменьшить природное разнообразие и пространственную вариабельность почвенного покрова, сделав его более гомогенным и экологически более приспособленным к требованиям относительно небольшого числа сельскохозяйственных культур и систем земледелия.

- относительная молодость науки о почвах и длительная разобщенность национальных школ почвоведов, работавших с разными почвами, сформировавшимися в разных природных условиях, получившими разные национальные и местные названия, и изученные с разной полнотой.

Отмеченные особенности почв требуют выработки и особых принципов классификации, отличных от принципов классификаций мира живых организмов, минералов и горных пород.

Почва, по современным представлениям, – это биокосная, многофазная, полидисперсная, многокомпонентная, гетерохронная, термодинамически открытая природная система. Указанные характеристики почвенной системы обуславливают высокое разнообразие ее морфологических, химических, физических и биологических свойств. Кроме того, взаимодействие факторов почвообразования, свойств почв происходит во времени, что определяет динамику почв, существование почвенных процессов, режимов, и в целом – эволюцию почв. Возраст почв на Земле чрезвычайно разнообразен – от единиц до млн лет. Вместе с тем почвенный покров мира в результате геологических глобальных процессов, а в последнее время – в результате антропогенного воздействия, постоянно омолаживается. Молодые и зрелые почвы отличаются по своим свойствам и функциональным особенностям, что также проявляется в возрастании разнообразия почвенного покрова Земли, особенно за счет появления различного рода “развивающихся” и “переходных” вариантов почв.

Высокое разнообразие факторов, процессов и свойств почв, разнообразие их эволюционных состояний и режимов позволяет при систематике почв пользоваться разными классификационными процедурами, выделять разные классификационные основания. Так, в различных классификациях и группировках почв используют самые разные почвенные свойства, процессы и режимы – от петрографического состава почвообразующей породы до режимов биогеохимических процессов. Поэтому вполне очевидно, что ключевым вопросом классификационной проблемы в почвоведении является выбор критериев, по которым производится систематика почв. По сравнению с объектами, изучаемыми биологией, почва не есть дискретное образование, и, следовательно, сначала нужно решить чрезвычайно сложную теоретическую проблему – что можно считать почвенным “индивидуумом”, т.е. неким минимальным объемом почвы, который несет в себе все признаки классифицируемого объекта. В отличие от геологической породы, которая также континуальное образование, почва обладает анизотропной структурой. В почве по-разному изменяются химический состав и физические свойства по вертикальной и горизонтальной ее осям. При этом вертикальная дифференциация почв не всегда связана только с современными процессами, но может быть и следствием наложения этих процессов на “почвенную матрицу”, оставшуюся от прошлых эпох (так называемые “полигенетичные” почвы). Все эти особенности почвы обуславливают отсутствие единых принципов систематики почв, что привело к тому, что в разных странах приняты национальные классификации, а единая международная классификация почв все еще находится в стадии разработки.

Несмотря на то что почвоведение как самостоятельная наука насчитывает немногим более ста лет, огромное разнообразие почв побуждало ученых упорядочить, систематизировать мир почв задолго до Докучаева. Наиболее известна классификация Колумеллы, который выделял почвы по гранулометрическому составу и пригодности для разных сельскохозяйственных культур. Этот подход мало изменился вплоть до XIX в. В 1821 г. Тэер выделял почвы пшеничные, ржаные, овсяные и т.п. В США почвы, используемые в сельском хозяйстве, делились по цвету и гранулометрическому составу, и им давали название местности, в которой они были впервые описаны (так называемые “почвенные серии”). В России для налогообложения использовали писцовые книги, а во второй половине XIX в. уже были предприняты попытки создать первые карты для географического учета почвенных ресурсов (Веселовский, Чаславский).

Докучаев, решительно выступив против одностороннего взгляда на почву только как на объект сельскохозяйственного производства, предложил первую



научную классификацию почв, которая включала не только используемые в сельском хозяйстве почвы, но и те, которые еще “никогда не видали сохи”. Он также разработал основы сравнительно-географического метода исследования почв, который позволил провести инвентаризацию почвенных ресурсов и оценить разнообразие почв. Этим результатам во многом способствовали особенности природных условий в наиболее освоенных земледельческих районах Русской равнины: относительная однородность почвообразующих пород и закономерное изменение климата с севера на юг. Это позволило Докучаеву и его ученику Н.М. Сибирцеву выделить так называемые “зональные” почвы в качестве наиболее высоких таксономических единиц – почвенных типов – соответствовавших наиболее характерным для данной местности “центральному образам” почв, какими явились подзол, серые земли, чернозем. Эти народные названия широко использовались в России еще задолго до возникновения почвоведения как науки. Докучаев среди причин отсутствия научных классификаций почв отмечал, что “... нигде, вероятно, ... не развита такая, в высшей степени типичная почва, как русский чернозем”. Основными недостатками всех существовавших ранее классификаций Докучаев считал “крайне произвольное, чрезвычайно искусственное и вовсе не соответствующее природе понятие о почве (а частью о коренной породе), которую никто не желал рассматривать как самостоятельное естественно-историческое тело, а всякий, по произволу, относил ее всецело то в область химии, то физики, то геологии, то сельскохозяйственной экономики”. Отмечая, что “на строение почв, доступное наблюдению всякого поселянина, до сих пор не было обращено никакого внимания, почему и стали ... придавать почвам самые произвольные определения...”, Докучаев предлагает “разуметь под почвой ...дневные или близкие к ним горизонты горных пород, которые были более или менее естественно изменены взаимным влиянием воды, воздуха и различного рода организмов..., только в таком смысле определяемую почву можно и следует классифицировать.” Вполне закономерно поэтому, что в российской школе почвоведения классификационная проблема решалась по принципу “от общего – к частному”. Основой многих классификаций, созданных российскими и советскими учеными, был почвенный тип, выполнявший роль “центрального образа”, характерного для данной природной зоны (или, в случае интразональных почв, для данного элемента рельефа – например, аллювиальные почвы, болотные почвы и др.).

По мере расширения географии проводимых исследований выяснилось, что распространение почвенных типов на территории Русской равнины имеет вполне закономерный характер в соответствии с изменением факторов почвообразования, что получило название **з а к о н а ш и р о т н о й з о н а л ь н о с т и**, а в ходе исследований на Кавказе такой же закономерный характер с изменением высоты местности был назван **з а к о н о м в е р т и к а л ь н о й з о н а л ь н о с т и**. Докучаевым были также предложены критерии для разделения типов на более мелкие таксономические единицы – по характеру факторов почвообразования и по свойствам самих почв, из которых наиболее важными он считал содержание гумуса и цеолитной глины (т.е. фактически гранулометрический состав). Однако в течение длительного времени объектом весьма многочисленных почвенных классификаций, имевших преимущественно концептуальный поисковый характер, оставался почвенный тип – “основной таксон, объединяющий большую группу широко распространенных почв, характеризующихся единством происхождения и процессов превращения и миграции вещества” [Прасолов, 1938], т.е. по существу речь шла о зональных почвах, наиболее характерных для той или иной природной зоны.

Первые так называемые “факторные” концептуальные схемы генетической классификации почв, созданные под влиянием идей Докучаева Сибирцевым [1895], Высоцким [1906], Глинкой [1908], Захаровым [1927], получили в дальнейшем развитие по двум основным направлениям.

Первое направление было связано с необходимостью выделения более мелких таксономических единиц – подтипов, родов, видов. В этом плане стоит особо выделить классификацию Герасимова–Завалишина–Ивановой [1939], которые стремились в своей работе “дать возможно более детальную схему, доведенную до мелких таксономических единиц”. Следует подчеркнуть, что появление этого классификационного подхода во многом было обусловлено необходимостью развития картографии почв как в мелком масштабе (при создании Почвенной карты СССР масштаба 1:1 000 000), так и крупномасштабной почвенной картографии для создания почвенных карт совхозов и колхозов. Действительно, при составлении карт преследуется цель отразить реальное разнообразие почв, слагающих данную территорию, но если для обзорных карт достаточно включить в легенду основные зональные и несколько интразональных типов почв, то для решения практических задач оценки почвенных ресурсов и планирования сельского хозяйства требуется более дробное деление почв. Это, как уже упоминалось, достигается за счет введения дополнительных диагностических признаков, учитывающих конкретные особенности строения профиля, морфологии горизонтов, химических и физических свойств почв. Введение более низких таксономических единиц позволяет оценить разнообразие почв в ландшафте, в котором, как правило, сформированы не только характерные для данной природной зоны типы и подтипы почв (развитые обычно на водораздельных поверхностях), но и почвы склонов, понижений, долин рек, ручьев, днищ балок и оврагов и т.п.

Второе направление связано с развитием эволюционной идеи. Коссович [1911], Глинка [1924], Неуструев [1926], Иванова и Розов [1966], Глазовская [1972], Ковда [1973], Герасимов [1975], Фридланд [1981], Розанов [1982], Шишов с соавт. [1993] взяли в основу генетической классификации почв последовательное развитие почвенного профиля из материнской горной породы. Они реализовали общетеоретическую концепцию почвоведения о том, что свойства и признаки современных почв объективно отражают историю их формирования, закодированную в почвенном профиле. В настоящее время подходы российско-советской школы почвоведения к классификации почв по праву носят название э в о л ю ц и о н н о - г е н е т и ч е с к и х. Основные принципы, положенные в основу этих подходов, заключаются в следующем:

- выделение типа почв как базового таксономического ранга для обозначения своего рода центральных устойчивых в географическом и эволюционном отношении образов почв, характеризующихся ярким проявлением основного процесса почвообразования при возможном одновременном проявлении сопутствующих процессов;

- возможность как объединять типы почв в таксоны более высокого ранга на основании литогенных, зонально-климатических биогеохимических или эволюционных особенностей, так и подразделять их на таксоны более низкого ранга. Такое разделение проводят при выделении почв переходных к другим типам, с разными степенями проявлениями основного и налагающихся процессов почвообразования, а также при выделении вариантов почв, особенности свойств которых связаны с проявлениями локальных условий почвообразования.

Другим путем (от частного – к общему) развивалась американская школа почвоведения и принципы классификации почв, оказавшие большое влияние

на развитие почвоведения во многих странах мира, особенно развивающихся, в силу относительной простоты системы классификации, отличающейся больше формализованным, чем генетическим подходом и четкой ориентацией всей системы на цели хозяйственного использования почв и их картографирования. Генетическая идея в Почвенной таксономии США заложена как бы изнутри. Хотя диагностика почв на самых высоких таксономических уровнях (порядках) проводится по наличию или отсутствию специально определенных диагностических горизонтов или существенных диагностических признаков почвообразования, сами порядки как своего рода “центральные образы” объединяют почвы, близкие по главному результату почвообразования, проявляющемуся в их существенных (главным образом морфологических) признаках. Эти “центральные образы”, имея близкие свойства, тем не менее, могут встречаться и в разных климатических условиях, что отражается на уровне подпорядка. В целом подпорядки примерно отвечают типам почв российско-советской школы, но под другими названиями. Дальнейшее таксономическое подразделение ведется на подгруппы (принцип разделения примерно отвечает подтипам), семейства и серии.

Несмотря на то что многие подходы российской школы классификации почв оказали огромное влияние на западно-европейское почвоведение, в последнем (в частности, во Франции, Германии, Великобритании) по сравнению с Россией более преобладают генетико-эволюционные подходы. В самой России и СНГ большее распространение получили зонально-географические и картографические подходы. Большую роль в становлении этих различий, безусловно, играют огромные размеры нашей страны и необходимость учитывать при инвентаризации почвенных ресурсов в первую очередь географическое разнообразие почв картографическими методами. В Западной Европе, где преобладают измененные человеком почвы, и на равнинных территориях отмечается высокая гомогенность почвенного покрова, большее внимание уделяется динамике почвообразования [Мюккенхаузен, 1975] и степени развития или преобразованности профиля [Дюшофур, 1968].

В последнее время наблюдается сближение всех школ классификации почв на основе экологических подходов с мощным акцентом на необходимость отражения условий и процессов почвообразования, свойств почв, преобразуемых человеком. Так, в целом ряде работ как российских, так и зарубежных ученых, звучат предложения о необходимости введения в классификации почв специальных таксонов для разного рода слабо развитых и деградированных почв, используемых в пахотном земледелии, эродированных и “обезглавленных” почв, городских почв или “урбаноземов”, хемоземов, антропогенно погребенных и “запечатанных”, регенерирующих или восстанавливающихся почв и т.п. Наблюдается сближение и с американской школой почвоведения, проявляющееся в предложениях использовать при диагностике почв простые диагностические критерии, в частности, диагностические горизонты и существенные диагностические признаки для облегчения возможности определения почв неспециалистами.

Эти объективные тенденции к международному сближению в подходах к классификации почв вполне закономерны и связаны с постепенным осознанием человечеством экологических проблем современности. Деградация почв, или как его называют “тихий кризис планеты”, – одна из составляющих этой проблемы.

Для более полного понимания сущности и возможных последствий деградации почвенного покрова планеты человечество нуждается во всестороннем ана-

лизе процессов снижения качества и количества почвенных ресурсов, утраты разнообразия почв. Полезным с этой точки зрения является не только российско-европейский эволюционно- и эколого-генетический подход к систематике и картографии почв, но и картографический и диагностический подходы к почвенной таксономии американской школы.

Действительно, использование простых детальных критериев диагностики, необходимых для определения разных, в том числе и низших таксономических единиц, разделяющихся по отдельным характеристическим почвенным свойствам, и доступных не только ученым и специалистам, но и представителям общественности, органам государственного контроля качества окружающей среды позволяет оперативно производить оценку изменений почв под воздействием меняющихся природных факторов и деятельности человека. Повторное крупномасштабное картографирование почв, при котором учитываются многие изменения на уровне мелких таксонов, отражающих реальное разнообразие почв на небольших территориях, позволяет более точно оценить не только глобальные изменения почвенного покрова, но и уловить даже едва наметившиеся тенденции, служащие индикаторами возможных неблагоприятных процессов будущего. Этой цели служит и такое направление как комплексный почвенный мониторинг, который невозможно проводить без существования детальной почвенной классификации, основанной на единых международных принципах.

Так, исследования, проводящиеся с помощью повторного картографирования почв, позволили установить поистине катастрофические масштабы негативного воздействия деятельности человека на почвенный покров. Распашка самых плодородных почв – черноземов – приводит при непродуманной системе землепользования к снижению содержания гумуса в полтора раза в течение нескольких лет. Время формирования этих почв составляет несколько тысячелетий. Простое сопоставление этих фактов показывает, насколько острой является проблема охраны почв от деградации в результате неправильного ведения сельского хозяйства, ветровой и водной эрозии, загрязнения промышленными отходами, уплотнения и т.п. Действительно, почва, учитывая длительность ее формирования, является во многом невозобновимым природным ресурсом (по крайней мере на протяжении существования человеческой цивилизации). Поэтому не случайно, что известный историк Л.Н. Гумилев связывает гибель некоторых цивилизаций с потерей плодородия почв (то, что становление наиболее развитых древних цивилизаций во многом обязано плодородию почв, можно считать бесспорным фактом). Необходимо особо подчеркнуть, что причиной потери плодородия является не хозяйственная деятельность как таковая, а научно не обоснованное использование земельных ресурсов – существуют тысячи примеров повышения плодородия исходно малопродуктивных в сельскохозяйственном отношении почв (например, подзолистых или почв пустынных регионов) и поддержания в течение длительного времени высокого уровня плодородия. Для повышения и поддержания плодородия необходим учет разнообразия почв и их свойств для выработки дифференцированного подхода к использованию тех или иных почв.

В последние годы человечество стало осознавать, что выживание цивилизации невозможно без сохранения устойчивого функционирования биосферы. Последнее же немислимо без сохранения биоразнообразия. Это положение нашло свое отражение в принятой ООН в 1992 г. Конвенции по биоразнообразию. В связи с этим становится очевидным еще один аспект в проблеме охраны почв: почвы нужно охранять не только как объект сельскохозяйственного производства, но и как неотъемлемый компонент наземных экосистем.

Проблема сохранения биоразнообразия на планете тесно связана с почвами по двум основным направлениям.

Во-первых, стоит вопрос о сохранении разнообразия самих почв как систем биологического характера (точнее – биокосных систем). Интенсификация антропогенного воздействия на природу Земли в целом и на почвенный покров, в частности, приводит, особенно в связи с вовлечением все больших площадей в сельскохозяйственное производство, к гомогенизации почвенного покрова основных сельскохозяйственных регионов и выравниванию пространственного разнообразия свойств почв. Так, например, целинные почвы сухостепной и полупустынной зон, в составе почвенного покрова которых во многом присутствуют солонцы, солоды и засоленные почвы, при вовлечении в земледелие и применяемых методах их мелиорации теряют солонцовые и засоленные свойства. Соли в них распределяются более равномерно как в пространственном отношении, так и в глубь почв, происходит уничтожение определенных самой природой естественных мест локализации токсичных солей, способствующих нормальному устойчивому сбалансированному функционированию всей ландшафтной системы. Подзолистые почвы лесной зоны, будучи распаханными, практически полностью теряют свои исходные свойства, подвергаются эрозии, теряют гумус и структуру верхних горизонтов. Микронеоднородность почвенного покрова этих территорий ликвидируется полностью.

Вместе с тем проблема сокращения географического разнообразия почв далеко не исчерпывает проблемы сокращения их генетико-эволюционного и структурно-функционального разнообразия. С этим тесно связана другая сторона роли почв в сохранении биоразнообразия на планете, а именно – проблема сохранения почв как среды обитания биологических организмов, среды, в которой плотность жизни на единицу объема является максимальной на единицу объема.

Действительно, можно сказать, что почва является не только природным образованием с максимальной плотностью жизни на Земле, но пожалуй, средой с максимальной “плотностью” биоразнообразия, поскольку внутри почвы вследствие ее гетерогенного состава создается большое разнообразие микрокусков, которые могут являться экологической нишей для самых разнообразных микроорганизмов. Так, почти во всех почвах, даже хорошо аэрируемых, всегда можно найти облигатно анаэробные бактерии, которые не выдерживают даже малейшего присутствия кислорода, что возможно благодаря тому, что в почве существуют микроагрегаты, изолированные от доступа воздуха.

Кроме того, разнообразие растений и сопряженных с ними гетеротрофных организмов также во многом обусловлено состоянием почвы, и при неблагоприятном воздействии на почву (например, при подкислении почвы за счет кислотных дождей) неизбежно происходит выпадение ряда видов растений и животных. Несмотря на то что многие организмы, обладающие широкой экологической пластичностью, могут обитать в разных почвах, многие виды растений и животных весьма избирательны к условиям среды, вследствие чего в естественных условиях можно наблюдать закономерное сопряженное изменение почвенного и растительного покрова при смене факторов почвообразования. Поэтому уничтожение какого-либо элемента почвенного покрова, например, при осушении болот лесной зоны, сведении лесов не только напрямую ставит под угрозу существования местообитания многих диких животных и растений, но и предопределяет снижение степени возобновления почвенного покрова этих территорий. Нарушенные почвы постоянно находятся в состоянии стресса, формирующие их процессы теряют устойчивые взаимосвязи с системой биогеоценоза,

что ведет к упрощению структуры антропогенно нарушенных биогеосистем и потере их устойчивости, буферной емкости и способности к самовосстановлению. Почвы же, как зеркало ландшафта, являются одновременно его памятью и главной матрицей. Согласно ряду последних исследований почвоведов и биологов, только в том случае, когда в результате какого-либо неблагоприятного воздействия (верховые лесные и степные пожары, умеренная пастбищная дигрессия, временное затопление) почвенный покров нарушается незначительно, возникают условия для быстрого восстановления нарушенных биогеоценозов в случае, если сохранен генофонд популяции. В случае более глубоких нарушений, затрагивающих и почвенный покров, время восстановления увеличивается в десятки раз.

Необходимо подчеркнуть еще один момент, касающийся проблемы роли почв в сохранении биоразнообразия: хорошо известно, что почвы, развитые на разных элементах рельефа, сопряжены в своем развитии. Так, характер почвообразования в почвах подчиненных (или аккумулятивных) ландшафтов (нижние части склонов, долины рек и ручьев, бессточные западины и др.) во многом определяется теми процессами, которые протекают в почвах автономных (или элювиальных) ландшафтов. Например, в таежной зоне в дерново-глеевых почвах, занимающих долины ручьев, практически все основные свойства почв – рН, содержание гумуса, состав поглощенных катионов, содержание элементов минерального питания растений – обусловлены процессами выветривания и выноса образовавшихся продуктов в почвы аккумулятивных ландшафтов. Следовательно, воздействие даже на один компонент почвенного покрова в той или иной степени сказывается на остальных компонентах, слагающих почвенный покров данной территории. Именно поэтому разнообразие факторов почвообразования приводит к разнообразию почв и к формированию педосферы, почвенного покрова суши со многоуровневой сложной организацией.

## Глава 4

### **ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ И ЕГО СТРУКТУРА КАК КОМПОНЕНТА НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

Почвенный покров суши представляет собой сложно организованную иерархически построенную открытую термодинамическую систему, которая обменивается с внешней средой веществом и энергией. Почвенный покров (ПП) является одним из важнейших компонентов наземных экосистем и может рассматриваться как их подсистема. Многообразие наземных экосистем обусловлено разнокачественностью экологических условий (факторов), в том числе и сложностью строения и свойств ПП. Вклад неоднородности ПП в многообразие и варьирование наземных экосистем изучен недостаточно.

Неоднородность и пестрота ПП – явление широко распространенное и известное.

Еще основоположникам современного научного почвоведения было известно, что ПП любой территории имеет довольно сложное мозаичное строение. Благодаря работам многих известных выдающихся ученых (Докучаев, Сибирицев, Глинка, Неуструев, Прасолов, Герасимов, Розов, Иванова и многих других) были установлены основные закономерности в общем строении ПП Земли и

прежде всего закономерности распространения ПП в зональном, провинциальном и региональном аспекте.

**ПП как пространственно организованный континуум почвенных тел.** Почвенный покров, с одной стороны, необходимо рассматривать как физически непрерывное образование, образующее педосферу Земли, с другой стороны, в пределах почвенного покрова можно выделять различающиеся по своему внутреннему строению объемы почв. Поэтому ПП можно рассматривать как прерывно-непрерывное (дискретно-континуальное) образование. Как отмечал Б.Г. Розанов [1983], каждая почва в пределах своих природных границ может рассматриваться как однородное и как неоднородное тело в зависимости от масштаба рассмотрения, в то же время почва всегда остается неоднородным телом по существу.

Явление пространственной неоднородности (анизотропности) ПП к настоящему времени достаточно изучено, разработаны методы оценки вариабельности как почвенных свойств и почвенных тел, так и отражение варьирования на методы почвенного и агрохимического картографирования [Сердобольский, 1937; Дмитриев, 1978; 1980 и др.]

**Уровни неоднородности ПП.** В строении ПП – сложном гетерогенном поверхностном образовании, можно выявить несколько уровней организации, каждому из которых соответствует определенная система географических закономерностей [Фридланд, 1984], присущая организации и всей природной среде [Герасимов, 1981].

Следует рассмотреть ПП на четырех уровнях его структурной организации, гармонически вложенных один в другой.

Самый высший уровень представлен *мегаструктурами* ПП суши, обусловленными внутренней жизнью Земли как планеты. Общепланетарный уровень проявляется в системе почвенно-биоклиматических поясов и почвенно-экологических областей, определяемых гидротермическими особенностями почвообразования, которые зависят от солнечной радиации и динамики атмосферы, вызывающей перенос тепла и закономерное распределение осадков и испарения. Особенно различны мегаструктуры ПП равнин и гор. Почвенный покров каждой из этих мегаструктур по-разному улавливает и использует солнечную энергию и влияет на динамику атмосферы и распределение влаги. Очень велико и агрономическое значение мегаструктур. Они характеризуются совершенно разными принципами землеустройства и использования сельскохозяйственных территорий, разными типами мелиорации и т.д.

Следующий уровень – *макроструктурный*, проявляется внутри почвенно-экологических областей и включает систему структур почвенной зональности.

В пределах макроструктур выделяются *мезоструктуры* ПП, связанные с геоморфологическим циклом развития суши, с неоднородностью литолого-геоморфологического строения самой поверхности, включая разновозрастность территории, т.е. неоднородность свойств самой исходной поверхности на небольших пространствах. Эти закономерности Докучаев называл *топграфией почв*. Для этого уровня характерна система почвенно-геохимических катен и почвенных сочетаний.

*Микроструктурный уровень* ПП, который является результатом пространственной динамики самого почвенного покрова, сочетания этой динамики с субаэральным литогенезом. Он, как наложенный рисунок, покрывает элементы мезоструктур. Происходит дифференциация ПП на комплексы и пятнистости почв в связи с неоднородностью почвенной массы и возникновение микрорельефа.

Таким образом, каждый уровень самостоятелен в своем развитии и, с другой стороны, связан с вышестоящим уровнем. Уровни как бы вложены один в дру-

гой и характеризуются одновременно самостоятельностью и соподчиненностью. В этом состоит основной принцип внутренней организации ПП как единой структурной системы.

Почвенный покров любой территории обладает той или иной структурой и без ее характеристики исследование не может быть полным.

Понимание пространственной неоднородности ПП, которая изучается через категории структуры почвенного покрова (СПП), очень важно для теории почвоведения и в целом для изучения наземных экосистем суши и окружающей среды.

Учение о СПП, разработанное В.М. Фридландом и его последователями, позволяет уяснить взаимосвязи ПП с факторами почвообразования, меняющимися в пространстве и во времени, и является отражением разнообразия почвенных свойств в спектре типов наземных экосистем.

*Структура почвенного покрова* – это совокупность всех однообразных неоднородностей ПП суши [Фридланд, 1972; 1984]. СПП состоит из определенных повторяющихся ареалов почв, образующих определенный состав и рисунок ПП, обладающих определенными механизмами взаимной связи и саморегулирования. Каждый тип СПП отличается единой историей развития и эволюции. СПП как любая сложная иерархически организованная система состоит из компонентов, способности их к функционированию, а также обладает новыми, возникшими (эмерджентными) свойствами. Последние свойства являются важным следствием иерархической организации, при которой свойство целого невозможно свести к сумме его частей. Система – это новые свойства, которых нет у ее отдельных частей. В СПП возникают также новые свойства, отсутствующие в профилях отдельных почв.

В последние годы исследователей все более начинают интересовать не только, а подчас и не столько, свойства отдельных почв, сколько эколого-географические закономерности пространственного взаиморасположения разных почв, пространственные переходы одних почв в другие, закономерности соотношения почв на данной территории и, наконец, причинно-следственные связи пространственной структуры ПП и разнообразия наземных экосистем.

Несмотря на то что педосфера представляет собой континуум, характеристики которого непрерывно изменяются, структурные единицы ПП должны обладать двумя признаками: относительной устойчивостью и автономностью, способностью к функционированию почвенных процессов и невозможностью присоединиться к соседним СПП или их частям без разрушения целостности самой СПП.

Исходной элементарной единицей ПП является *элементарный почвенный ареал* (ЭПА), термин В.М. Фридланда. ЭПА – это наиболее простая географическая единица, участок территории; ареал не имеет внутри себя каких-либо почвенно-географических единиц, он не делится на другие образования этого же класса понятий. ЭПА представляет такое почвенное образование, в пределах которого изменение морфологических и внутренних свойств имеет лишь количественный характер, не позволяющий отмечать какие-либо качественные изменения почвы. Единица элементарна. Она представляет собой неделимую лишь относительно единицу, только в географическом понимании. В почвоведении ЭПА очень сложен и делим на множество почвенных индивидуумов (педонов), горизонтов, структурных отдельностей и т.д.

Понятие ЭПА близко по содержанию в геоботанике фитоценозу, в ландшафтоведении – почвенному покрову элементарного ландшафта Б.Б. Полюнова, фации Л.С. Берга и парцелле Н.В. Дылиса.



*Парцелла* – это структурно-специфическая часть горизонтального расчленения биогеоценоза, отличающаяся составом, структурой и свойствами компонентов, спецификой связей и материалом энергетического обмена [Дылис, 1969; Карпачевский, 1981]. Парцелла – элементарная единица биогеоценоза, почвенный компонент которой близок к понятию ЭПА.

Не на всех территориях можно выделять ЭПА. Встречаются контуры, в которых анизотропность направлена от центра контура к краям. Например, лугово-черноземные почвы на склонах Молдавии (мочары), образование которых связано с выклиниванием грунтовых вод и постепенным изменением от лугово-болотных до лугово-черноземных и черноземных почв; формирование в центре контура солончаков и черноземов солончаковатых на выходах третичных засоленных глин; развитие почвенной тессеры (микрокатены) от дерева-эдификатора к краю кроны и парцелле окна в лесном БГЦ.

Выделяются гомогенные и гетерогенные ЭПА.

Гомогенные ЭПА состоят из однородных почвенных образований, относящихся к определенной низшей классификационной единице. Это так называемая внутриконтурная изменчивость, при которой свойства почв внутри ЭПА колеблются в пределах параметров диагностических признаков.

Гетерогенные ЭПА разделяются на:

1. Спорадически-пятнистые ареалы, которые сформировались из гомогенных ареалов, в которых формируются своеобразные почвы, генетически не связанные с фоном контура. Обычно они имеют биологическую природу в результате воздействия фито- и зооценозов. Спорадически-пятнистые ЭПА имеют широкое распространение в различных почвенных зонах. Хорошо изучены пятна почв (перерыхлых, карбонатных, щелнистых черноземов), возникающих у норк сурков и сусликов (высокая карбонатность, иногда засоленность, перерыхлость гумусового горизонта, щелнистость). Широко распространен почвенно-ветровальный комплекс в лесных экосистемах, представленных заболоченными скальпированными подзолистыми почвами ветровальных понижений и перемешанными гумусированными почвами ветровальных бугров на участках вывалов деревьев.

2. Регулярно-циклические ЭПА характеризуются гетерогенностью иного типа. В них чередуются пятна почв, близких по строению профиля и свойствам, резко меняющиеся мощностью горизонтов, что связано с периодическим набуханием и растрескиванием почвенной толщи. Возникновение регулярно-циклических ЭПА связано с процессами физического характера, с набуханием при увлажнении и сжатием при иссушении, а также с процессами замерзания и разморозания. Они имеют полигональное строение поверхности.

На детальных и крупномасштабных картах выделяются округлые, кольцевые, древовидные, полосчатые, струйчатые, полигональные и др. ЭПА, характеризующие генетико-геометрические их формы.

Взаимосочетание и чередование в определенном порядке отдельных ЭПА, генетически связанных и обусловленных между собой, в пространстве образуют *почвенные комбинации* (ПК). Это ареалы различных почвенных групп (подзолистые и болотные, каштановые и солонцы и др.). ПК, мозаично или симметрично повторяясь, образуют определенные СПП.

В смежных науках понятию ПК соответствуют: в ландшафтоведении – ландшафтное звено (М.А. Глазовская), в геоботанике – комбинация фитоценозов (А. Исаченко), в биогеоценологии – почвенный компонент БГЦ (В.Н. Сукачев, Н.В. Дылис).

Для всякой СПП, как правило, можно выделить два яруса – мезокомбинации (сочетания, вариации), обычно связанные с мезорельефом или с неоднород-

ностью почвообразующих пород (мозаики и ташеты), и входящих в них микрокомбинации (комплексы, пятнистости), чаще всего связанные с микрорельефом [Фридланд, 1972; 1984]. В комплексах и пятнистостях важное значение имеет генетическое взаимовлияние всех компонентов по элементам микрорельефа (связь двусторонняя). В сочетаниях и вариациях одни компоненты по элементам мезорельефа развиваются под преимущественным влиянием других (связь односторонняя). Отличия заключаются также в том, что в комплексах дифференциация ПП, формирование неоднородности ПП происходит одновременно с развитием микрорельефа. Это в сущности единый процесс дифференциации территории. Сочетания образуются на элементах мезорельефа независимо от них. Они обусловлены формами рельефа, но по чисто внешним причинам. В сочетаниях ареалы почв имеют довольно крупные площади (порядка га и более), могущих иметь свое хозяйственное использование. В комплексах ареалы почв чередуются через каждые несколько метров или десятков метров и хозяйственное значение определяется свойствами комплекса в целом.

Комплексность ПП свойственна многим биоклиматическим зонам. Особенно она широко распространена в сухостепной, полупустынной и тундровой зонах. "Царством" комплексов являются территории, где наиболее экстремальные биоклиматические условия с дефицитом влаги, или тепла, или того и другого и контрастные по увлажнению локальные условия (рельеф, выходы грунтовых вод).

Большая комплексность ПП в сухостепной и полупустынной зонах (Прикаспий, Присивашье, Бараба, Кулунда и т.д.) обусловлена резко засушливым климатом (высокой испаряемостью – 600–80 мм на фоне малого количества выпадающих осадков 250–300 мм) и засолением почвообразующих пород (морские, древние коры выветривания и др.) с близким залеганием к поверхности солевых горизонтов или засоленных грунтовых вод. Здесь распространены округло-пятнистые солонцовые комплексы, состоящие из лугово-степных солонцов солончаковатых, остепненных солонцов, перерытых солонцов-солончаков, светло-каштановых солонцеватых почв и в понижениях лугово-каштановых почв.

В условиях вечной мерзлоты, в тундре, при периодическом замораживании и оттаивании верхнего слоя почвы возникают полигональные, криогенно-солифлюкционные комплексы тундровых почв.

Сочетания почв по элементам мезорельефа широко распространены в гумидном климате на низменных аккумулятивных и цокольных возвышенных равнинах, пластовых и платформенных средневысотных равнинах. На Русской равнине это разнообразные сочетания подзолистых, подзолисто-болотных и болотных почв.

ПП любой территории обладает сложным, мозаичным рисунком, сформированным различными ПК. Причиной дифференциации ПП и развития ПК служит многообразие проявлений факторов почвообразования в пространстве.

Таковыми факторами являются рельеф как перераспределитель влаги, растворимых веществ и тепла; ускоренная водная эрозия и дефляционные процессы; оползни, аллювиальные и пролювиальные процессы, карстовые и суффозионные процессы, мерзлотные явления, неоднородность почвообразующих пород, уровня залегания грунтовых вод, пестрота растительного покрова и воздействие животного мира. Особый вклад в разнообразие, разнокачественность ПП и ПК вносит деятельность человека, причем эта деятельность приводит как к гомогенизации, так и гетерогенизации ПП.

Научно-обоснованная и целенаправленная деятельность человека устраняет сложность и контрастность ПП и приводит к выравниванию, гомогенизации

почвенных свойств и созданию мощного культурного слоя, включает глубокую вспашку, известкование и внесение достаточных доз органических и минеральных удобрений, осушение заболоченных почв с последующим их окультуриванием и т.д. В некоторых случаях человек создает новый тип СПП. Коренная мелиорация, глубокая плантажная вспашка с перемещением больших объемов гумусных слоев и лессовых пород в Молдавии [Урсу, 1980] привело к формированию техногенно-преобразованных сконструированных СПП с вновь созданным строением черноземных почв.

Хаотичная, случайная деятельность человека в результате мелиорации, агротехники, вырубки леса химического или механического загрязнения и т.д., сопровождается негативными последствиями, что приводит к усилению контрастности и сложности ПП, усилению дифференциации ПП, появлению новых почвенных тел и ПК на месте бывших однородных массивов. Такие явления наиболее часто наблюдаются:

1) при распахивании склонов и появлении ускоренной плоскостной и линейной эрозии, в результате чего образуются пятнистости и комплексы, а иногда и сочетания автоморфных неэродированных и эродированных почв. Годельман [1981] считает, что неоднородность ПП в Молдавии возросла в три–четыре раза за счет эродированных почв в агрикультурный период;

2) при строительстве водохранилищ и подтоплении прилегающих территорий, в результате чего усиливается контрастность ПК или возникают новые автоморфно-гидроморфные ПК на месте однородных массивов;

3) сплошные рубки лесных массивов и заболачивание лесосек приводит к образованию автоморфно-гидроморфных сочетаний на месте крупных простых ПК;

4) лесные пожары могут стимулировать дифференциацию ПП. Естественная неоднородность предопределяет пространственную и глубинную неравномерность прогорания почвы. В итоге создается новый пирогенный тип СПП, при этом возрастает контрастность ПП [Сапожников, 1980];

5) чрезмерное понижение уровня грунтовых вод на значительных территориях в полесских ландшафтах привело к иссушению легких почв и способствовало формированию литокатен современной дефляции [Тихоненко, 1980].

Неоднородность ПП, понимаемая через анализ СПП, дает возможность разработать классификацию СПП и представить систему организации почвенных тел как систему соподчиненных понятий. В разработанной Фридландом [1984] классификации учитываются следующие системы характеристик: типы почвенных комбинаций; механизмы геохимических и геофизических связей между компонентами ПП, отражающие факторы его дифференциации; компоненты ПП и их количественные соотношения; генетико-геометрическое строение ПП (табл. 4).

Как пример, приводится список генетико-геохимических разрядов СПП, определяемые свойствами, дифференцирующими ПП, и механизмами его дифференциации (табл. 5)

#### **Отражение СПП на разномасштабных почвенных картах.**

Основным методом изучения и фиксации пестроты и неоднородности ПП служит *картография почв*. Наиболее значительными успехами в учении СПП надо отметить применение его в картографии. Практически на всех современных почвенных картах отражается неоднородность ПП с показом микро- и мезоструктур ПП.

Мелкомасштабная картография способствовала выявлению неоднородностей ПП, обусловленных биоклиматическими условиями изменений термиче-

**Таксономическая система классификации структуры почвенного покрова  
[Фридланд, 1984]**

Обобщенный таксономический уровень	Наименование	Содержание и диагностические признаки
1	Категория	Ведущее значение микроструктур или мезоструктур
2	Формация	Ведущее значение определенных классов почвенных комбинаций (комплексов, сочетаний и т.д.)
3	Разряд	Генетико-геохимическое содержание структуры–характер и механизм дифференциации почвенного покрова, переносимые между компонентами вещества и энергия
4	Семейство	Компоненты почвенного покрова, его контрастность
5	Подсемейство	Количественное соотношение компонентов почвенного покрова (его состав)
6	Форма	Генетико-геометрическое строение почвенного покрова, его сложность

ских условий и степени увлажнения и проявляющихся на больших пространственных интервалах в пределах почвенных зон, подзон и провинций.

Крупномасштабная и детальная картография позволяет изучить более мелкие пространственные изменения, связанные с неоднородностью самой дневной поверхностью, главным образом с литолого-геоморфологическими условиями. Добротная почвенная карта, на которой точно отображены все контуры почв, тем не менее нуждается в дополнениях и генерализации контуров. Это объясняется многими причинами: слишком много контуров и карта плохо читается; одноименные почвы, принадлежащие разным ПК, значительно различаются по агрономическим свойствам [Григорьев, Шубина, 1980]. В настоящее время появляется реальная возможность перехода от показа преобладающих почв к отображению на крупномасштабных почвенных картах типов СПП и ПК. Почвенная карта должна представлять собой не механическое чередование контуров, а показать группы почв, связанные общностью условий почвообразования и определенных ландшафтов. Содержание почвенных карт всех масштабов существенно обогащается, если каждый контур карты характеризуется не только составом ПП и классом СРР, но и условиями залегания по рельефу и генетико-геометрическими особенностями ПП.

Почвенные карты с изображением СПП как мелкомасштабные, так и средне- и крупномасштабные с картографических позиций тоже составляются с применением геометрической и классификационной генерализации, но применяется также более сложный метод – типолого-пространственный (объединение территории с неоднородным ПП по типам СПП). На картах показаны не преобладающие почвы, а “однородно пестрые”, по выражению Сибирцева, массивы, ограниченные определенными качественными и количественными характеристиками. Таким образом, почвенные карты с изображением СПП позволяют за счет разгрузки контурности карт сделать их более читаемыми, удобными для использования, сохраняя на них информацию о ПП.

**Наиболее распространенные генетико-геохимические разряды структуры почвенного покрова [по Фридланду, 1984]**

Характер перемещения масс между компонентами СПП	Механизм дифференциации почвенного покрова	Разряд по свойствам почв, дифференцирующих почвенный покров
Водно-миграционный	Дифференциация по увлажнению Дифференциация минерального состава и увлажнения	Подчиненно-гидроморфный; автоморфно-гидроморфный Дифференцированно-засоленный; дифференцированно-солонцовый
Денудационно-аккумулятивный	Русловой	Русловой эрозионный; русловой аккумулятивный
	Плоскостной эрозионный	Смыто-намытый
	Осыпной	Разрушенно-погребенный
	Оползневой	Деформированно-погребенный
Криогенный	Криогенный	Криогенно-солифлюкционный
	Эоловый перенос	Дефлированно-аккумулятивный
Биомиграционный	Фитогенный	Фитодифференцированный
	Зоогенный	Зоодифференцированный
Перемещение масс не имеет определяющего значения	Высотно-экспозиционный	Высотно-экспозиционный

На почвенных картах разного масштаба выделяются контуры четырех видов: 1) однородные (ЭПА); 2) условно однородные (выделенные в результате классификационной генерализации); 3) неоднородные, характеризуются составом ПП; 4) неоднородные структурные, характеризуются составом ПП и типом СПП. Они подразделяются на микро-, мезо-, макроструктуры ПП.

На детальных картах представлена лишь ЭПА. На крупномасштабных картах – ЭПА, простые ПК и условно однородные контуры; на среднемасштабных почвенных картах районов и областей – мезо- и микроструктуры ПП и условно однородные контуры. Мелкомасштабные почвенные карты – это карты макроструктур ПП, а на территориях с господством комплексов – микроструктур ПП.

**Неоднородность ПП как фактор, осложняющий сельскохозяйственное использование земель. Необходимость учета разнообразия СПП в целях оптимизации землепользования.**

В истории земледелия нет практики учета неоднородности ПП, так как в мелких хозяйствах того времени небольшие поля обрабатывались соответственно данным свойствам почв.

В наши дни, при использовании современной крупногабаритной техники на больших по площади полях, проблема пестроты полей и неоднородности ПП привлекает все большее внимание почвоведов и агрохимиков. Разнообразие почв должно учитываться при определении направления хозяйства, планировании и проектировании мелиоративных мероприятий, повышении плодородия

почв, охране и защите их от эрозии и деградации, учете качества территории и определении стоимости земли.

Пестрота ПП влияет на продуктивность сельскохозяйственных угодий. Отрицательная роль пестроты ПП, вызывающая ежегодный недобор урожая сельскохозяйственных культур, особенно стала проявляться при переходе производства на индустриальные технологии возделывания культур, предусматривающие одновременную обработку почвы и посев в пределах одного поля. Так, в пределах одного поля в подзоне дерново-подзолистых почв распространены четыре–пять, а иногда и более почвенных разновидностей, которые различаются по гранулометрическому составу, гумусированности и степени увлажнения. Различия в почвах настолько существенны, что не могут обеспечить одновременных сроков сева и выровненный агрофон. Причиной этому является перераспределение органо-минеральных питательных элементов по элементам микрорельефа. В результате в понижениях и западинах скапливается высокое содержание фосфора и калия, в то время как на повышениях их меньше. Эта закономерность сохраняется в течение всей вегетации культур. Все это сказывается на величине урожайности сельскохозяйственных культур. Так, на одном поле разница в урожае картофеля на одном из участков Белоруссии составила 122 ц/га, озимой пшеницы – 4 ц/га и ячменя 6 ц/га [Романова и др., 1988].

В Воронежской области было исследовано влияние почвенной неоднородности внутри ЭПА на биологическую продуктивность озимой пшеницы [Адерихин, Шубина, 1980]. Показано, что внутри ЭПА (50 × 50 м) среднее содержание гумуса колеблется на 2%, содержание подвижного калия на 8 мг-экв, общая биомасса озимой пшеницы различается в пределах 115–158 ц/га. Обследование 1000 ЭПА, охвативших 150 почвенных разновидностей почв Казахстана, за пять лет показало, что урожайность в зависимости от погодных условий резко меняется по годам внутри ЭПА и колеблется больше, чем в целом по хозяйству [Бобров, Кислинский, 1980]. Разница в урожайности яровой пшеницы на обыкновенных черноземах солонцеватых составляла 19,3 ц/га.

Такие существенные различия в плодородии почв одного пахотного контура и даже ЭПА, указывают на необходимость разработки мероприятий по уменьшению влияния неоднородности ПП на урожайность культур в целях оптимизации земледелия.

Пока неоднородность ПП учитывается через известную оценку “мелкоконтурности угодий” [Романова и др., 1988]. В Белоруссии, по данным Белгипрозема, средняя величина контура колеблется от 5,4 га до 17,7 га. В пределах одного поля есть почвы, занимающие до 10–20% площади, поспевающие с разницей в 10–12 дней.

Как показали исследования, с одной стороны, неоднородность ПП – отрицательное явление, осложняющее сельскохозяйственное использование земель; с другой, – неоднородность ПП является скрытым резервом повышения производительности почв, на который пока еще мало обращают внимание. В естественных экосистемах неоднородность почв сохраняет биоразнообразие.

Основные закономерности географии СПП обусловлены биоклиматическими, геоморфологическими факторами и деятельностью человека. В зависимости от уровня организации ПП меняются размеры и состав почвенных комбинаций, которые отражают сложность процессов формирования педосферы.

## Глава 5

### ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУКТУРЫ ПЕДОСФЕРЫ

Организация почвенного покрова (ПП) определяется взаимодействием нескольких групп факторов и условий.

#### Биоклиматические условия строения ПП

Глобальные климатические закономерности строения и формирования ПП проявляются в горизонтальной и вертикальной зональности и фациальности почв. Горизонтальная зональность выражается в образовании ограниченного числа географических, почвенно-биоклиматических поясов, а внутри них почвенных зон – полосчатых ареалов макроструктур почвенного покрова на равнинах. В зависимости от гидротермических условий почвенные зоны имеют широтное или меридиональное простирание. В.М. Фридланд предложил различать несколько типов зональных почвенных структур. В областях влажного и очень сухого климата смена почвенных зон обусловлена изменением термического фактора. В умеренно влажных областях причиной смены почвенных зон является степень увлажнения. Если возрастания температуры и сухости климата совпадают, происходит быстрая смена почвенных зон на небольшом протяжении и образуется целый широтно-зональный спектр (например, южные районы Русской и Западно-Сибирской равнин). Когда увлажнение изменяется в другом направлении по сравнению с термическими условиями, то почвенные зоны теряют широтно-полосчатую форму и приобретают во многих случаях меридиональное направление (например, южная половина Северной Америки).

Биоклиматическая фациальность вызвана изменением степени увлажнения и континентальности климата, определяемыми крупными макроструктурными регионами на континенте (по отношению к океанам, горам и др.). Это приводит к радикальному осложнению горизонтальной зональности вплоть до формирования особых типов почв и индивидуальных закономерностей их географического распределения. Фациальные закономерности могут проявляться в общности почвообразования как в ряде зональных почвенных типов (почвенно-биоклиматические области), так и внутри почвенных зон (почвенные провинции).

В горных системах мира выражена вертикальная почвенная зональность. Состав и структура вертикальной почвенной зональности определяются положением горной страны в системе географических поясов, а в пределах пояса ее положением в различных секторах увлажнения (приокеанских или континентальных). Имеют значение высота горной страны, положение склонов по отношению к преобладающему движению воздушных масс, экспозиция склонов и наличие температурных инверсий. Влияние горных хребтов на изменение атмосферного увлажнения прилегающих равнин приводит к возникновению спектров более влажных почвенных зон у подножия наветренных склонов гор (предгорно-гумидная зональность) и более сухих почвенных зон в “дождевой тени” гор (аридно-теневая зональность). Примером предгорно-гумидной зональности являются равнины Предкавказья, северные предгорья Тянь-Шаня и Копетдага. Аридно-теневая зональность характерна для межгорных изолированных котловин или нагорий, защищенных от влажных воздушных масс более высокими горными поднятиями (межгорные котловины Центральной Европы, Сибири,

Средней Азии, холодные пустыни Тибета, пустыня Атакама в Центральных Андах). Несмотря на всю сложность горного почвообразования, можно выделить типы структур вертикальной зональности почв, учитывающие состав и взаиморасположение почвенных зон в горах в пределах географических поясов и фаций увлажнения. Почвенно-биоклиматические пояса и почвенно-биоклиматические области образуют зонально-фациальную мегаструктуру почвенного покрова Земли.

Почвенный покров, в котором ведущую роль играют почвенные комплексы, образует два отчетливо выраженных пояса. Первый пояс криогенных комплексов (арктическая и тундровая зоны, мерзлотные регионы таежной зоны) – термическое явление. Второй пояс солонцовых комплексов (зоны суббореальных сухих степей и полупустынь) – итог континентального соленакопления при ограниченном, но еще достаточном для перераспределения солей количеством влаги. География мезоСПП связана с зонально-климатическими условиями, от которых зависит механизм перемещения и перемещающиеся в катенах вещества. Широко распространены дифференцированно-увлажненные мезоСПП, особенно велика их роль в зонах достаточного увлажнения. В зонах умеренного увлажнения преобладают разряды дифференцированного увлажнения–насыщения, в более засушливых – дифференцированно-солонцовых и дифференцированно-засоленных. Эта общая закономерность нарушается в близких по сумме осадков засушливых районах субтропиков и тропиков, где в результате короткого, но четко выраженного периода дождей, соли вымываются, что ослабляет их роль в дифференциации СПП. В пустынях заметную роль в дифференциации мезоСПП играет химизм засоления, но степень различия компонентов ослабляется.

### **Литолого-геоморфологические закономерности строения СПП**

Положительные и отрицательные элементы рельефа любого уровня связаны между собой процессами денудации и аккумуляции, геохимическим потоком веществ. Это приводит к пространственной дифференциации геохимического фона, на котором протекает почвообразование. С крупными морфоструктурами Земли и сопряженными с ними почвообразующими породами, занимающими большие пространства, связаны и мегоструктуры почвенного покрова – почвенно-геохимические общности (почвенно-геохимические формации В.А. Ковды, почвенно-геохимические поля М.А. Глазвской). На этой геохимической основе идет геохимическая дифференциация почвенного покрова и коры выветривания, приводящая к формированию сопряженных почвенно-геохимических ландшафтов и определенных типов макроструктур СПП. Особенно ярко закономерная смена отложений и связанных с ними литогенно-упорядоченных макроструктур СПП проявляется в межгорных котловинах, на подгорных, древнеаллювиальных и флювиогляциальных равнинах, вокруг действующих или недавно потухших вулканов в связи с ослаблением интенсивности пеплопадов по мере удаления от центра извержения. В горах, на плоскогорьях и цокольных равнинах, где близко к поверхности подходят плотные изверженные и осадочные породы пестрого литологического состава, формируются мозаичные, неупорядоченные литогенные макроСПП.

Дифференциация почвенного покрова в связи с рельефом и почвообразующими породами выражена в формировании мезоструктур СПП. Компонентный состав СПП определяют литолого-геоморфологические условия внутри зоны, зависящие от дренированности территории, химико-минералогического и грану-



лометрического состава пород, а также генетико-геометрического строения мезоструктур почвенного покрова. Оно определяется, во-первых, особенностями рельефа, тектонически обусловленными морфоструктурными, во-вторых, морфоскульптурами рельефа, созданными под влиянием различных экзогенных процессов. Влияние морфоструктурного основания на ПП проявляется на денудационных возвышенных равнинах, в горах, на плато и нагорьях, где выходы на поверхность различных плотных пород и их щебнистых дериватов обуславливают литологическую неоднородность и неупорядоченные мозаичные структуры и сложные сочетания-мозаики. На денудационно-аккумулятивных равнинах влияние литологического морфоструктурного основания проявляется в меньшей степени (на участках с глубоким эрозионным расчленением). Здесь широко распространены древовидные (эрозионные) структуры (приледниковый пояс Европы, Великие равнины Северной Америки и др.) На аккумулятивных равнинах дифференциация ПП определяется экзогенным рельефом, определяющим господство сочетаний почв с упорядоченными генетико-геоморфологическими формами. На равнинах Северной Америки и Евразии с холмисто-моренным ледниковым рельефом распространены округло-пятнистые мезоструктуры, полосчатые и разреженно-древовидные сочетания водно-ледниковых равнин.

### **Историко-геологические закономерности строения ПП**

Современный почвенный покров – гетерохронное образование. Отчетливо выражена его зависимость от возраста процессов выветривания и почвообразования. Поверхность и связанный с нею ПП денудационных возвышенных равнин, плато и плоскогорий, особенно в тропиках (пепленды Африки, Южной Америки, Австралии) формировались млн лет и в ряде случаев претерпели глубокие изменения климатических условий. В тропиках на значительных пространствах сохранилась древняя ферраллитная кора выветривания и продукты ее переотложения, а возраст ПП (как совокупности почв) насчитывает млн лет. Выступая в качестве почвообразующих пород весьма специфического состава, “старые почвы” определяют наличие реликтовых признаков в современных почвах и ПП, особенно характерных для засушливых и пустынных субтропических и тропических регионов. Длительность формирования ПП в области последнего оледенения (север Европы, север Канады и др.) – тысячи лет. Еще моложе ПП на низких террасах рек, озер, морей, современных вулканических отложениях – десятки и сотни лет.

Закономерные смены СПП разного возраста могут быть связаны как с эволюцией биоклиматических факторов, так и с развитием рельефа. Особенно отчетливо они выражены на древнеаллювиальных и приморских низменностях, где с различными по возрасту геоморфологическими уровнями и улучшением дренированности связаны определенные стадии развития ПП, часто сохраняющего реликтовые черты гидроморфизма. Наряду с различиями СПП, зависящими от возраста процессов выветривания и почвообразования, в почвенном покрове крупных геотектонически обособленных морфоструктурных регионов суши существуют черты сходства, связанные с общностью геологической истории и строения территории. Крупные территориальные общности почвенного покрова, сложившиеся в процессе геологической истории современной морфоструктуры суши и характеризующиеся определенными типами мегаструктур ПП, которые Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская, С.А. Шоба выделяют в качестве почвенно-геологических стран (Балтийская, Восточно-Европейская, Западнo-Сибирская).

Рассмотренные закономерности создают многообразие почвенного покрова на разных уровнях его структурной организации, что отражают мировые почвенные карты.

### Мировые почвенные карты

Начало мировой картографии почв было положено “Схемой почвенных зон Северного полушария”, составленной В.В. Докучаевым в 1899 г. в масштабе 1:50 000 000. Она содержала всего восемь выделов, включая пять широтных почвенных зон (бореальную, таежно-лесную, черноземных степей, аэральную и латеритную). Карту составили методом дедукции, исходя из учения о соответствии почв факторам почвообразования. На зональном почвенно-климатическом принципе построена легенда. Значение картосхемы было исключительно велико. Она показала, что распространение почв на земном шаре не хаотично, а закономерно и вполне объяснимо. Карта наглядно отразила открытый Докучаевым закон широтной зональности почв и определила главные принципы составления почвенных карт мира.

Концепция зональности была положена в основу дальнейшей разработки мировых почвенных карт, составленных под руководством К.Д. Глинки [1906, 1915, 1927], Л.И. Прасолова [1937], Келлога [1938], Д.Г. Виленского [1950], И.П. Герасимова [1956, 1960, 1964]. Карты совершенствовались, во-первых, в отражении все большего разнообразия почв мира и корректировке границ их ареалов (на почвенной карте мира К.Д. Глинки 1906 г. было показано 18 выделов почв, на карте Л.И. Прасолова – уже 30, а на карте И.П. Герасимова 1964 г. – 93 выдела). Во-вторых, на картах отражалось строение ПП и уточнения географо-генетических закономерностей распространения различных почв. Так, уже на картах Глинки наряду с широтными зонами были показаны и меридиональные зоны, различия почвенных зон в океанических и внутриконтинентальных частях материков. Прасолов и Герасимов типы почв объединяли в мировые географические пояса с отражением зональной структуры поясов в приокеанических и внутриконтинентальных фациях.

В 1974 г. на X Международном конгрессе почвоведов в Москве была представлена новая Почвенная карта мира под ред. В.А. Ковды, Е.В. Лобовой, Г.В. Добровольского и Б.Г. Розанова. Карта выполнена в масштабе 1:10 000 000 на основании обобщения новейших почвенно-картографических материалов. Легенда карты содержит 293 основных таксонов почв. Помимо зонально-фациальных закономерностей географии почв карта отражает также почвенно-геохимические и эволюционно-генетические закономерности строения ПП Земли. Наиболее крупные выделы на карте представлены 12 почвенно-геохимическими формациями. Они объединяют почвы, образованные в сходных геолого-тектонических условиях, имеющих общую историю развития и близкий характер геохимического круговорота и трансформации органических и минеральных веществ. Историко-эволюционные черты почвенного покрова отражены в разделении формаций на более однородные группы, представляющие возрастные стадии формирования почв от наиболее молодых гидроморфных и полугидроморфных до палеогидроморфных и автоморфных. Внутри стадийных групп выделены типы почв, объединенные общностью зонально-фациальных особенностей.

Особое место среди мировых почвенных карт занимает Почвенная карта мира ФАО/ЮНЕСКО. Это первая в истории почвоведения мировая карта, разработанная на основе международного сотрудничества. Составление ее за-

няло 15 лет (1960–1975 гг.) Карта опубликована на 19 листах в масштабе 1:5 000 000 с фундаментальными пояснительными текстами. В легенде карты выделено 26 групп типов почв и 133 типа или основных почвенных единиц. Достоинство карты – согласованная номенклатура и количественные диагностические критерии выделения типов почв, относительно крупный масштаб и насыщенность информацией картографических единиц: в каждом контуре наряду с преобладающими показаны подчиненные почвы, гранулометрический состав и рельеф. Карта ФАО/ЮНЕСКО – наиболее подробная современная Почвенная карта мира.

В 1982 г. была издана Почвенная карта мира масштаба 1:15 000 000 для вузов, составленная М.А. Глазовской и В.М. Фридландом. Карта хорошо отражает закономерности генезиса и географии почвенного покрова мира. В легенде карты выделены 24 генетические группы почв, объединяющие 110 почвенных единиц (типов или подтипов). Легенда представляет собой матрицу, в которой все многообразие почв расположено в поле координат: по горизонтали указаны типы водного режима почв, а по вертикали – типы температурного режима почв. Карта дает хорошее представление о разнообразии почв мира, содержит обобщенную почвенно-геохимическую и гидротермическую характеристику выделенных группировок почв и отражает закономерности их распространения. На этой карте впервые в мировой картографии почв показаны основные структуры почвенного покрова, геометрические формы которых тесно связаны с рельефом, почвообразующими породами и геологической историей территории.

Общие закономерности строения ПП и его региональной дифференциации наиболее последовательно отражены на картах почвенно-географического районирования. Почвенно-географическое районирование – это разделение территории на регионы, однотипные по СПП, сочетанию факторов почвообразования и возможностям хозяйственного использования почв. Районирование отражает СПП на разных уровнях его организации и служит методом систематизации, анализа и выявления главных особенностей ПП.

Впервые ПП Земли был разделен на почвенно-климатические пояса и агропочвенные области с учетом особенностей почвенного покрова, вызванных различиями гидротермических условий, Н.Н. Розовым и В.М. Фридландом. В настоящее время существуют разные подходы к районированию ПП суши земли. М.А. Глазовская разработала почвенно-геохимическое районирование мира. Наиболее крупной единицей являются почвенно-геохимические поля, рассматриваемые как территории с господством определенной геохимической ассоциации субэкральных (атмосферного увлажнения) почв или закономерным сочетанием нескольких геохимических ассоциаций. Расположение полей соответствует основным зонам увлажнения континентов. Каждое поле характеризуется господствующей в почвах реакцией, определенными особенностями гумуса и химико-минералогического состава минеральной части почвы. В системе термических поясов почвенно-геохимические поля делятся на почвенные секторы, характеризующиеся специфическим для данного отрезка поля составом семейств субэкральных почв. Обладая единством гидротермических условий, секторы совпадают в своих границах с основными группами типов зональных природных ландшафтов. Закономерно сменяя друг друга на континентах мира, почвенные секторы образуют в совокупности мегоструктуру ПП Земли. Почвенные секторы делятся на почвенные области, имеющие определенный тип макроструктуры ПП или закономерное сочетание нескольких типов, причем под типом структуры понимается пространственное соотношение семейств субэкральных почв.

ральных почв на данном участке сектора. В зависимости от факторов дифференциации М.А. Глазовская выделяет биоклиматогенные (равнинно- и горно-зональные), вулканогенные, литогенные, палеогидрогенные, палеоклиматогенные, и др. типы макроструктур ПП. Почвенные области с равнинно-зональным или горно-зональным типом макроструктур ПП могут подразделяться на почвенные зоны. В почвенных областях, где зональность почв не выражена, выделяются подобласти.

В основу схемы почвенно-экологического районирования мира, разработанного Н.Н. Розовым и М.Н. Строгановой, положен биоклиматический принцип. Таксономическая система районирования состоит из двух уровней – почвенно-биоклиматических поясов и почвенно-биоклиматических областей, выделение которых базируется на агроэкологической группировке почв. Пояса понимаются как ареалы почвенно-агроэкологических классов, объединяющих почвы по сходству температурного режима. Области – это ареалы почвенно-агроэкологических подклассов (почвы в пределах класса со сходным режимом атмосферного увлажнения: гумидные, семигумидные и др.).

Значительно более полно разработаны и обоснованы принципы и система таксономических единиц почвенно-географического районирования. Они реализованы в схеме почвенно-географического районирования СССР масштаба 1:12 500 000 и сопровождающей ее монографии под редакцией Е.Н. Ивановой, П.А. Летунова, Н.Н. Розова и др. [1962], и в карте масштаба 1:8 000 000 для ВУЗов [1983], составленной Г.В. Добровольским, Н.Н. Розовым и И.С. Урусевской. Таксономическая система районирования учитывает особенности СПП и состоит из следующих единиц: почвенно-биоклиматический пояс, почвенно-биоклиматическая область, почвенная зона (в горах горная почвенная провинция), почвенная провинция, почвенный округ и почвенный район. Эта система позволяет не только показать сложность строения ПП на всех уровнях его организации в тесной связи с главными факторами дифференциации, но и объяснить ее с точки зрения законов генезиса и географии почв. Однако мелкий масштаб мировых почвенных карт, а также недостаток материалов не позволяет провести столь детальное районирование почвенного покрова мира. Ниже кратко рассматривается почвенный покров мира с учетом глобальных закономерностей строения ПП, обобщенных в рамках почвенно-биоклиматических поясов и областей.

### **Почвенный покров полярного пояса**

Полярный пояс занимает 13% площади суши, более 2/3 его территории покрыто ледниками Антарктиды, Гренландии и других островов. В Северном полушарии в пределах пояса выделяются две почвенные области: Евразийская и Северо-Американская. В Антарктиде имеются лишь совсем небольшие районы, свободные ото льда. В почвенном покрове полярного пояса различают арктическую и субарктическую зоны. В арктической зоне с очень суровым и сухим климатом, под куртинами растительности по морозобойным трещинам образуются арктические почвы. У них укороченный профиль, нет признаков оглеения, слабокислая и нейтральная реакция, почти полная насыщенность поглощающего комплекса основаниями. На Крайнем севере в аридных условиях формируются арктические пустынные почвы, имеющие на поверхности солевые корочки.

В субарктической зоне с менее холодным и более влажным климатом под мохово-лишайниковой и мохово-кустарничковой растительностью на суглини-

сто-глинистых породах широко распространены тундровые глеевые почвы. Слабая испаряемость и неглубоко залегающая многолетняя мерзлота способствуют переувлажнению и оглеению профиля. Тундровые глеевые почвы характеризуются фульватным гумусом, большей кислотностью, меньшей насыщенностью основаниями в отличие от арктических почв. На каменистых и хрящеватых песчано-супесчаных породах, богатых по минералогическому составу, в условиях хорошего дренажа формируются почвы с бурым морфологически неоподзоленным и неоглеенным профилем – тундровые подбуры. Это кислые, ненасыщенные почвы, обогащенные органическим веществом, в составе которого преобладают фульвокислоты. Широко распространены в субарктической зоне болотные почвы. Общая особенность почвенного покрова полярного пояса – комплексность, связанная с проявлением мерзлотных процессов. В арктической зоне и континентальных частях субарктической зоны господствуют трещинно-наполюгональные комплексы. В более влажных океанических и умеренно-континентальных фациях Субарктики широко представлены пучинно-бугорковые комплексы.

Евразийская полярная область лежит преимущественно в субарктической зоне. Северо-Американская область проникает значительно севернее. На островах и севере Гренландии господствуют ландшафты арктических пустынь. Еще более сухие и холодные ландшафты характерны и для районов, лишенных ледяного покрова в Антарктиде.

В полярном поясе распространены охота и оленеводство. Земледелие очаговое, преимущественно закрытого грунта, развивающееся близ городов и промышленных центров. Тундровые почвы легко поддаются эрозии после нарушения растительного покрова. Насущная проблема при освоении Севера – охрана природы тундры.

### **Почвенный покров бореального пояса**

Бореальный пояс включает 18% площади почвенного покрова Земного шара и хорошо развит только в северном полушарии. Он распространен в Северной Америке, Европе и Азии в умеренно холодном климате и преимущественно занят таежными лесами. Суммы температур воздуха более 10 °С составляют 600–2200°, продолжительность вегетационного периода от 40 до 150 дней. Зимой почвы могут промерзать на срок до 5–8 месяцев и более. На горные территории приходится 34% общей площади пояса. ПП сформирован главным образом на рыхлых сиаллитных отложениях четвертичного возраста. Выделяют несколько групп почвенных областей: 1) таежно-лесные континентальные (Северо-Американская и Европейско-Сибирская) с преобладанием подзолистых, кислых и бурых лесных почв, 2) лугово-лесные приокеанические с дерново-торфянистыми почвами (Исландско-Норвежская, Беринго-Охотская и Огненноземельская), 3) мерзлотно-таежные с криогенными (мерзлотно-таежными) почвами (Северо-Американская и Восточно-Сибирская).

Северо-Американская и Европейско-Сибирская таежно-лесные континентальные области подвергались древним оледенениям. На территориях господствовали ледниковые и водно-ледниковые типы рельефа, флювиогляциальные, моренные, озерноледниковые отложения разного гранулометрического состава, а также перигляциальные покровные лессовидные суглинки. В строении ПП выражены широтно-зональные и фациальные закономерности, особенно отчетливые в Европейско-Сибирской области. Почвы – глееподзолистые, подзолистые, дерново-подзолистые, на легких породах – альфегумусовые подзолы, в

низкогорьях – лесные бурые кислые. Подзолистые почвы характеризуются наличием под подстилкой осветленного подзолистого горизонта, четкой элювиально-иллювиальной дифференциацией профиля, кислой реакцией, малой емкостью и ненасыщенностью основаниями поглощающего комплекса, низким содержанием гумуса фульватного состава. В глееподзолистых почвах в отличие от подзолистых проявляются признаки поверхностного оглеения, а в дерново-подзолистых формируется гумусово-аккумулятивный горизонт с более значительным содержанием гумуса. В подзолах альфегумусовых, так же как и в подбурах, развиты процессы иллювиования органо-минеральных комплексов. Подзолы образуются на бедных породах и в них под подстилкой появляется белесый подзолистый горизонт. Заметную роль в СПП континентальных таежных лесов играют болотно-подзолистые и болотные почвы, на карбонатных породах – дерново-карбонатные почвы. Заболачивание и оглеение широко распространены на Западно-Сибирской равнине.

На карбонатных лессовидных суглинках под широколиственными или хвойно-широколиственными лесами в Западной Европе развиты лесные буроземы, на более континентальной Восточно-Европейской равнине они замещаются серыми лесными почвами. Своеобразные серые лесные почвы (grey wooded soils) встречаются в Северо-Американской области у подножия Скалистых гор.

Для бореально лугово-лесных приокеанических областей характерны дерново-торфянистые субарктические почвы под разнотравно-злаковыми лугами. Ведущий процесс в них гумусово-аккумулятивный. Широко распространены пеллово-вулканические почвы. Особенно много их на Камчатке, Курильских и Алеутских островах, на Аляске. Пеллово-вулканические почвы слоисты и содержат погребенные почвенные профили (результат периодических пеллопадов).

В группе бореально мерзлотно-таежных областей выделяют Восточно-Сибирскую и Северо-Американскую почвенные области. Отличительная черта почв – наличие в пределах профиля или у его нижней границы многолетней мерзлоты, которая зимой смыкается с сезонно-промерзающим слоем. Восточно-Сибирская область охватывает обширные пространства Средней и Восточной Сибири. Для нее характерны экстроконтинентальный холодный климат с большим диапазоном атмосферного увлажнения, господство горного рельефа и разнообразие состава почвообразующих пород (в основном продуктами выветривания коренных пород). Леса представлены светлохвойной лиственничной тайгой. В пределах области господствуют горно-зональные макроструктуры ПП. На равнинной территории различают две подзоны: северо- и среднетаежную. В почвенном покрове преобладают на суглинисто-глинистых породах глее-мерзлотно-таежные (в северной тайге) и мерзлотно-таежные (в средней тайге) почвы в сочетании с мерзлотными болотными. Мерзлотно-таежные почвы с признаками криотурбаций и надмерзлотного оглеения имеют кислую реакцию, низкую насыщенность основаниями, фульватный потечный гумус и слабо дифференцированы. В глее-мерзлотно-таежных почвах оглеение охватывает весь профиль. В средней тайге распространены также более светлые аналоги кислых бурых лесных почв – дерново-лесные. К легким породам приурочены подбуры и альфегумусовые подзолы, к карбонатным породам – перегнойно- и дерново-карбонатные почвы. На суглинисто-глинистых нещелочистых продуктах выветривания траппов формируются своеобразные почвы с недифференцированным профилем – грануземы. В наиболее континентальных сухих и холодных районах области (Центрально-Якутская котловина) распространены палево-мерзлотные почвы, а среди них по депрессиям рельефа встречаются луго-

во-черноземные и засоленные почвы. Палевые мерзлотные почвы имеют монотонный профиль, нейтральную или слабо щелочную реакцию, насыщены основаниями, содержат 3–5% гумуса.

Северо-Американская мерзлотно-таежная область меньше по площади и почвенный покров ее менее разнообразен. Территория области расположена в подзоне северной тайги. В ПП преобладают подбуры, глее-мерзлотно-таежные и мерзлотные болотные почвы.

Земледельческая освоенность бореального пояса едва достигает 5%. Главной причиной этого является суровость климатических условий, прежде всего недостаток тепла для выращивания большинства сельскохозяйственных культур. Основные направления хозяйственного использования бореального пояса – лесное хозяйство, охота и оленеводство. Южные районы таежной зоны по почвенно-климатическим условиям благоприятны для возделывания зерновых и технических культур и интенсивно осваиваются. Главные проблемы земледелия – внесение органических и минеральных удобрений и мелиорации заболоченных почв.

### **Почвенный покров суббореального пояса**

Суббореальный почвенно-биоклиматический пояс немного меньше бореального и на него приходится 16% площади ПП земного шара. Расположен в северном полушарии – в Евразии и Северной Америке, в южном полушарии к нему относятся лишь небольшие территории на юге Аргентины и Новой Зеландии. Горные массивы, как и в бореальном поясе, занимают 1/3 поверхности. По сравнению с бореальным лучше обеспечен теплом и резче дифференцирован по увлажнению. Годовая сумма температур более 10 °С колеблется в пределах 2200–4000°, продолжительность вегетационного периода от 130–210 дней. Зимой почвы промерзают на время от нескольких дней до 4–5 месяцев. Почвообразование протекает на сиаллитных карбонатных и бескарбонатных корах выветривания. В распределении почв хорошо выражена горизонтальная зональность: широтная на внутренних равнинах Евразии и меридиональная в Северной и Южной Америке. При движении от океанов в глубь материков происходит смена ландшафтов от более влажных к более сухим с нарастанием континентальности климата, что вызывает появление в почвах фациальных различий. В пределах пояса выделяются три группы почвенных областей: 1) влажные лесные области с лесными буроземами, 2) степные области с черноземами и каштановыми почвами, 3) полупустынные и пустынные области со светлокаштановыми, бурыми полупустынными и серо-бурими пустынными почвами (рис. 10).

Суббореальные влажные буроземно-лесные области расположены на океанических окраинах почти всех континентов. В почвенном покрове господствуют буроземы. Они формируются под широколиственными, хвойно-широколиственными и хвойными лесами и характеризуются промывным водным режимом, кислой или слабо-кислой реакцией всего профиля или его верхней части, ненасыщенностью основаниями, повышенным содержанием подвижных форм железа, слабой дифференциацией профиля на генетические горизонты. Буроземы разделяют на слабоненасыщенные (типичные) и сильноненасыщенные (кислые). Наряду с ними широко распространены буроземы с осветленным верхним горизонтом – лессивированные и оподзоленные. В северном полушарии наиболее значительны по площади Западно-Европейская и Северо-Американская (приатлантическая) области.

Западно-Европейская буроземно-лесная область не подверглась оледенению и характеризуется сложным рельефом (чередованием гор, возвышенностей, аккумулятивных равнин), разнообразием почвообразующих пород, господством в прошлом широколиственных лесов. Почвенный покров представлен буроземами (типичные, кислые, лессивированные, оподзоленные), различия которых обусловлены пестротой пород и степенью расчленения поверхности. Они чередуются с подзолистыми почвами и рендзинами. На внутренних равнинах, окруженных горами, формируются выщелоченные и оподзоленные черноземы.

Северо-Американская восточная буроземно-лесная область лежит на побережье Атлантического океана преимущественно в зоне смешанных и широколиственных лесов, для которой характерны буроземы лессивированные и кислые. На западе области под высокотравными бородачево-ковыльными прериями распространены черноземовидные почвы (в США их называют бруниземами). От черноземов они отличаются промывным водным режимом, кислой реакцией, преимущественно фульватным составом гумуса, отсутствием иллювиально-карбонатного горизонта. Они сменяются на слабодренированных участках своеобразными лугово-черноземовидными и более влажными черноземовидными луговыми почвами, с признаками оглеения и железисто-марганцевыми конкрециями. Лугово-черноземовидные и луговые почвы прерий встречаются и в Восточно-Азиатской буроземно-лесной области, которая отличается более холодным, муссонным климатом. Длительное сохранение в почвах сезонной мерзлоты вызывает застой влаги и временное поверхностное переувлажнение почв. Северо-Американская западная, Южно-Американская и Новозеландско-Тасманская буроземно-лесные области характеризуются горным рельефом и господством в ПП бурых лесных почв, сменяющихся с высотой горно-луговыми почвами. В ПП Американских областей распространены пеплово-вулканические почвы (андосоли).

В суббореальном поясе выделяют три степные области, почвенный покров которых представлен преимущественно черноземами и каштановыми почвами. Они образуются под многолетней травянистой лугово-степной и степной растительностью в условиях периодически промывного и непромывного водного режима. Профиль черноземов слагается из двух основных горизонтов – гумусового и иллювиально-карбонатного. Для черноземов характерны аккумуляция большого количества гуматно-кальциевого гумуса (до 15%), хорошая агрегированность, благоприятные физические свойства, насыщенность основаниями, нейтральная и слабощелочная реакция, стабильность минеральной почвенной массы. Каштановые почвы формируются в условиях более засушливого климата и отличаются от черноземов уменьшением мощности гумусового горизонта и содержания в нем гумуса, более высоким залеганием карбонатного горизонта, под которым обычно присутствует гипсовый и солевой горизонты. Черноземы и каштановые почвы образуют сочетания с полугидроморфными (лугово-черноземными и лугово-каштановыми) и луговыми почвами. Значительное участие в СПП, в отрицательных элементах рельефа принимают различные засоленные почвы. В макроструктуре ПП степных областей отчетливо прослеживаются зонально-фациальные закономерности. Самая большая по площади Евразийская область расположена в центре одноименного континента, преимущественно на территории СНГ. В ПП с севера на юг сменяют друг друга серые лесные почвы и черноземы лесостепи, обыкновенные и южные черноземы степи и каштановые почвы сухой степи, образующие широтные зоны. С учетом фациальных особенностей черноземы СНГ разделяют на четыре фации: южно-



европейскую, восточноевропейскую, западносибирскую и восточносибирскую. Фациальные различия проявляются главным образом в гумусовом и солевом профилях, а также в температурном режиме почв. СПП в лесостепной и сухостепной зонах связана с интенсивным развитием просадочного западного рельефа, эрозионными процессами, гидроморфной солонцеватости, засоления и осолодения. Комплексность ПП выражена на плохо дренированных низменностях в лесостепи и степи (Западно-Сибирская, Окско-Донская и др.), в сухостепной зоне.

В Северо-Американской степной области зоны черноземов и каштановых почв вытянуты в меридиональном направлении. Американские черноземные и каштановые почвы по строению профиля и свойствам близки к соответствующим почвам Евразии. В почвенном покрове степей Северной Америки меньше солонцеватых почв и солонцов. Южно-Американская степная область невелика по площади. В ней преобладают каштановые почвы, а черноземы приурочены к предгорьям Анд на юге материка.

Суббореальные полупустынные и пустынные области занимают более 1/3 площади пояса и распространены на обширных пространствах Средней и Центральной Азии и в наиболее аридных районах Северной и Южной Америки. Почвенный покров их слагается светло-каштановыми, бурыми полупустынными, серо-бурими пустынными почвами, а также песками, такырами и солончаками. Профиль бурых полупустынных почв состоит из маломощного слоеватого гумусового с хрупкой корочкой в верхней его части, карбонатного, гипсового и солевого горизонтов. Содержание гумуса низкое (1–2%), состав фульватный, реакция слабощелочная или щелочная. Серо-бурые пустынные почвы имеют с поверхности пористую корку, под ней слоеватый и ниже карбонатный и гипсовый горизонты. Характерны низкое содержание гумуса (менее 1%), максимум карбонатов с поверхности, щелочная реакция по всему профилю. Серо-бурые почвы обычно засолены легкорастворимыми солями.

Низкое количество атмосферных осадков способствует сохранению продуктов выветривания в почвенной толще и развитию процессов осолонцевания и засоления почв. Солонцеватость несколько ослабляется в районах с осадками муссонного типа. В горных системах Центральной Азии (Тибетское нагорье, Памир и др.) в условиях чрезвычайной сухости климата, холоде и близости ледников формируются высокогорные пустынные почвы – маломощные, щебнистые, карбонатные и малогумусные. В замкнутых депрессиях широко распространены солончаки, окружающие соленые озера. На равнинных территориях Центрально-Азиатской области проявляется горизонтальная зональность в распределении светло-каштановых, бурых полупустынных и серо-бурых пустынных почв. Характернейшая черта СПП, особенно в полупустыне – комплексность. В почвенном покрове Северо-Американской области преобладают песчаные и щебнистые бурые полупустынные мелкокарбонатные и малогипсовые почвы, сходные с аналогичными почвами Центральной Монголии. Большие пространства заняты каменистыми и щебнистыми слаборазвитыми почвами. В депрессиях рельефа, вокруг озер распространены солончаки и солонцы. ПП Южно-Американской области представлен светло-каштановыми и бурими полупустынными почвами Патагонского плоскогорья.

В сельскохозяйственном отношении суббореальный пояс является самым освоенным поясом Земли, на его территории сосредоточено более 1/3 земледельческих площадей мира. Наиболее распаханы черноземы, бундиземы и каштановые почвы. В составе посевов на этих почвах господствуют озимая и яро-

вая пшеница, кукуруза, ячмень, а также сахарная свекла, подсолнечник и др. Это главные “хлебные” районы Мира. Основной проблемой земледелия на черноземах и особенно каштановых почвах является сохранение влаги в почве, а местами и орошение. Буроземы интенсивно используются в земледелии, но нуждаются в органических и минеральных удобрениях. Пустыни и полупустыни используют для пастбищного животноводства. Земледелие – орошаемое, площадь пашни незначительна.

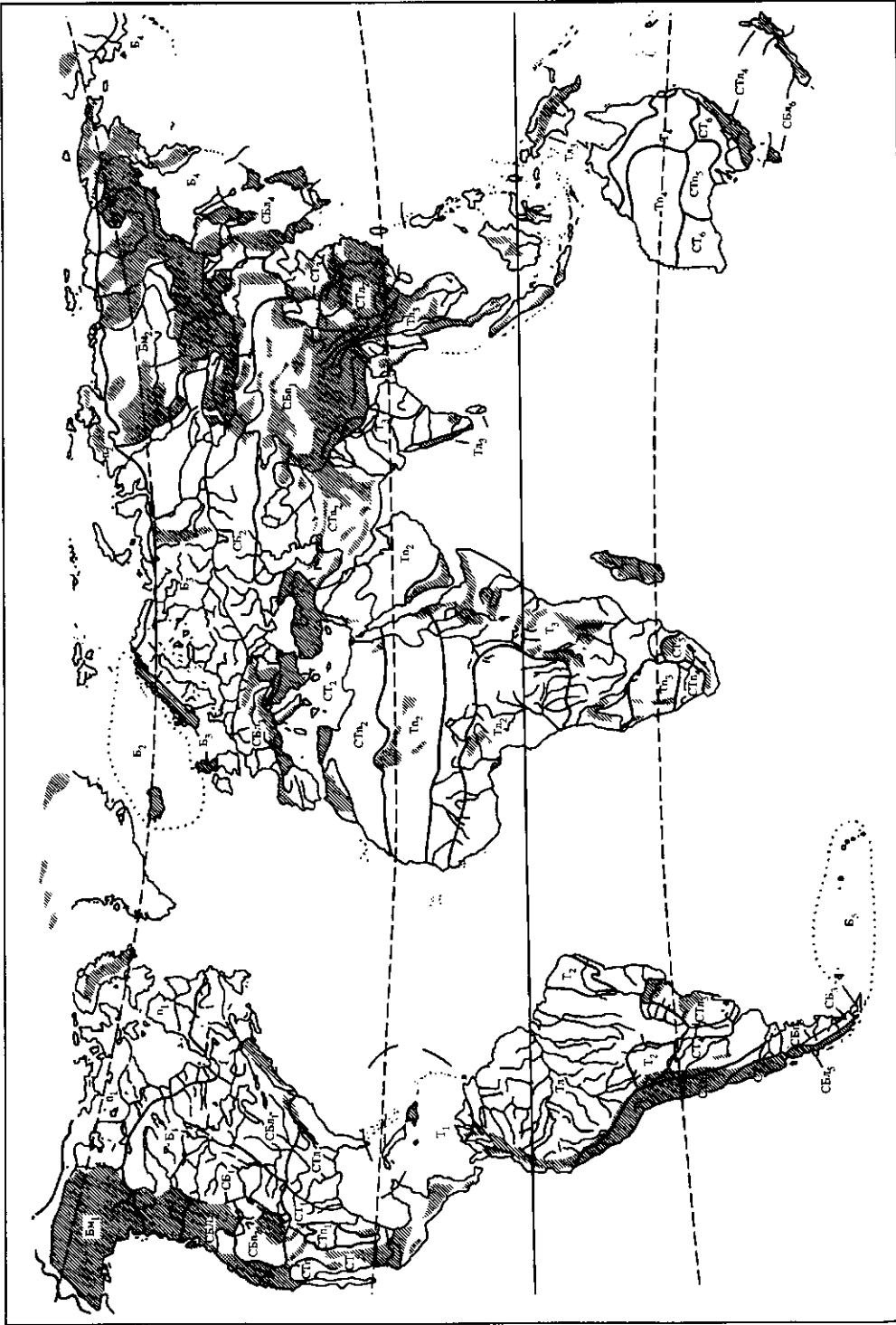
### Почвенный покров субтропического пояса

Субтропический пояс включает 20% площади почвенного покрова Мира. Горные территории занимают 29% общей поверхности пояса. Сумма активных температур воздуха варьирует от 4000 до 8000 °С, вегетационный период от 200 до 365 дней. Тепловые ресурсы позволяют выращивать два полных урожая в год. Преобладают аридные и субаридные ландшафты. Почвообразование происходит преимущественно на сиаллитных карбонатных и засоленных корах выветривания. Горизонтальная зональность в распределении почв имеет ограниченное проявление, но хорошо выражены фациальные особенности. Смена ландшафтов и почв в субтропиках обусловлена главным образом увлажнением, которое убывает по мере удаления от океанических побережий. В пределах субтропического пояса различаются три группы почвенных областей: 1) влажно-лесные области с красноземами и желтоземами, 2) ксерофитно-лесные и кустарниково-степные области с коричневыми и серо-коричневыми почвами и 3) полупустынные и пустынные области с сероземами и пустынными почвами.

Субтропические влажно-лесные области – это области, где выпадает от 1000 до 2500 мм осадков в год. Наиболее значительны по площади Северо-Американская и Восточно-Азиатская области. В ПП преобладают желтоземы и красноземы. Для них характерны промывной водный режим, кислая реакция, фульватный состав гумуса, ферраллитный или сиаллитно-ферраллитный состав минеральной части почв с узким отношением  $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ . Красноземы формируются на основных изверженных породах и на древних ферраллитных корах выветривания, желтоземы – на осадочных породах.

В южном полушарии площадь влажных субтропиков значительно меньше. Здесь выделяют две области – Южно-Американскую и Австралийскую. В ПП Южно-Американской области преобладают красноземы под хвойными и хвойно-лиственными лесами и красновато-черные почвы – руброземы под высоко-травными субтропическими прериями. В руброземах слабая ферраллитизация сочетается с интенсивным гумусонакоплением, водной режим промывной и карбонаты в профиле отсутствуют. Красновато-черные почвы имеются и в Северо-Американской субтропической области, в ее западной менее влажной части, на границе с сухими субтропиками. Австралийская влажно-лесная область характеризуется горным рельефом и господством в ПП желтоземов и желто-бурых почв. Гидроморфные почвы влажно-лесных субтропических областей представляют желтоземно-глеевые, луговые, болотные и аллювиальные.

Субтропические засушливые ксерофитно-лесные и кустарниково-степные области распространены на всех материках (рис. 10). Почти все они имеют сложный рельеф: чередуются горные хребты, плоскогорья, плато и межгорные впадины. Горизонтальные почвенные зоны большей частью не выражены, а господствует горная зональность. В почвенном покрове преобладают коричневые и серо-коричневые почвы. Они сформированы преимущественно на сиал-



литно-карбонатных корках выветривания, причем коричневые почвы распространены под низкорослыми разреженными ксерофитными лесами, а серо-коричневые – под кустарниковыми субтропическими степями. Для них характерны непромывной водный режим в условиях переменного-влажного климата. Наблюдается вынос из почвенной толщи легко растворимых солей и образование в средней и нижней части профиля иллювиально-карбонатного горизонта. Коричневые почвы содержат 5–8% гумуса, обладают высокой емкостью катионного обмена, нейтральной или слабощелочной реакцией. Часто коричневые почвы имеют красноватые оттенки в окраске, что может быть связано с красноцветными ферраллитными или ферритно-сиаллитными корками выветривания. Серо-коричневые почвы занимают переходное положение между коричневыми почвами и сероземами. Они отличаются от коричневых почв щелочной реакцией, невысоким содержанием гумуса (2–4%).

Среди почв засушливых и сухих субтропиков sporadически распространены черные слитые почвы, тяжелого гранулометрического состава, слитого сложения, значительным количеством в составе вторичных минералов монтмориллонита. Им свойствен непромывной водный режим и часто высокое содержание карбонатов. В сухое время года они плотны и трещиноваты, а в сырое – сильно набухают и становятся вязкими. Многие исследователи связывают их генезис с гидроморфной стадией развития. Однако эти почвы встречаются и на возвышенных равнинах, сложенных породами основного состава – базальтами, траппами и др. В странах Балканского полуострова подобные почвы называют “смолницы”, в Марокко – “тирсы”, в Южной Америке – “терра-негро”. На международных почвенных картах и в классификациях они получили название “вертисоли”. Наряду со слитыми почвами в СПП субтропических засушливых областей находятся лугово-коричневые, лугово-серо-коричневые, луговые и аллювиальные почвы. Крупные массивы луговых, преимущественно слитых почв показаны на Почвенной карте мира Глазовской и Фридланда [1982 г.], в бассейне Парагвая и в низовьях Хуанхе.

В субтропическом поясе наиболее значительны по площади полупустынные и пустынные области. Три четверти территории занимают примитивные и малоразвитые почвы субтропических пустынь. Их разнообразие в большой степени определяется особенностями почвообразующих пород. Шире всего распространены почвы каменистых и каменисто-глинистых пустынь с “пустынным за-

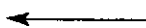


Рис. 10. Почвенно – биоклиматические области мира.

*Тропические влажные лесные области:* Тл1 – Американская; Тл2 – Африканская; Тл3 – Австрало-Азиатская. *Тропические саванные области:* Т1 – Центрально-Американские; Т2 – Южно-Американские; Т3 – Афро-Азиатские; Т4 – Австралийская. *Тропические полупустынные и пустынные области:* Тп1 – Афро-Азиатская; Тп3 – Южно-Африканская; Тп4 – Австралийская. *Субтропические влажные лесные области:* СТл1 – Северо-Американская; СТл2 – Восточно-Азиатская; СТл3 – Южно-Американская; СТл4 – Австралийская. *Субтропические засушливые области:* СП1 – Северо-Американская; СП2 – Средиземноморская; СП3 – Восточно-Азиатская; СП4 – Южно-Американская; СП5 – Южно-Африканская; СП6 – Австралийская. *Субтропические пустынные и полупустынные области:* СПп1 – Северо-Американская; СПп2 – Афро-Азиатская; СПп3 – Южно-Американская; СПп4 – Южно-Африканская; СПп5 – Австралийская. *Суббореальные лесные области:* СБл1 – Северо-Американская восточная; СБл2 – Северо-Американская западная; СБл3 – Западно-Европейская; СБл4 – Восточно-Азиатская; СБл5 – Южно-Американская; СБл6 – Новозеландско-Тасманская. *Суббореальные степные области:* СБ1 – Северо-Американская; СБ2 – Евразийская; СБ3 – Южно-Американская. *Суббореальные пустынные и полупустынные области:* СБп1 – Центрально-Азиатская; СБп2 – Северо-Американская; СБп3 – Южно-Американская. *Реальные мерзлотно-таежные области:* Бм1 – Северо-Американская; Бм2 – Восточно-Сибирская. *Реальные таежно-лесные области:* Б1 – Северо-Американская; Б2 – Исландско-Норвежская; Б – Европейско-Сибирская; Б4 – Берингово-Охотская; Б5 – Огненно-земельная. *Полярные области:* П1 – Северо-Американская; П2 – Евразийская; штриховкой показаны горные массивы.

гаром” – на поверхности щебня или скал образуются темные корочки, содержащие железо и марганец. Также много солевых, карбонатных, гипсовых корок на нижней стороне камней и поверхности почв. Местами в каменистых пустынях развиты серо-бурые пустынные почвы. Более всего они распространены в Азии. Песчаные пустыни в субтропиках занимают значительно меньшие площади по сравнению с каменисто-глинистыми и, как правило, представлены переважаемыми песками, лишенными почвенного покрова.

В субтропических полупустынях распространены почвы сероземного типа. Наиболее типичные сероземы образуются на лессовидных отложениях и лессах и приурочены к предгорьям и подгорным равнинам. Они имеют слабо дифференцированный профиль без верхней корки, карбонаты с поверхности, максимум карбонатов приходится на среднюю часть профиля. Сероземы содержат 1–3% гумуса, обладают слабощелочной реакцией. Кроме того, заметное место в ССП пустынных областей занимают солончаки и такыры.

Земледельческая освоенность субтропического пояса составляет 17%. Наиболее распаханы почвы засушливых и влажных областей – коричневые почвы, красноземы и желтоземы, черные слитые и пойменные почвы. В полупустынных и пустынных областях главные земледельческие площади приурочены к сероземам и пойменным почвам. В долинах Нила, Тигра, Евфрата, Инда, Хорезма и других рек возникли самые древние центры земледельческой культуры. Субтропический пояс обладает широким набором сельскохозяйственных растений (пшеница, хлопчатник, виноград, цитрусовые, субтропические орехоплодные и плодово-ягодные культуры). Более половины пашни в субтропиках не обеспечены атмосферной влагой. Главная проблема субтропического земледелия – ирригация.

### **Почвенный покров тропического пояса**

Тропический пояс – самый большой по площади. На него приходится 42% всей площади почвенного покрова Земного шара. Горные территории невелики и занимают около 13% общей поверхности. Тропический пояс характеризуется жарким климатом с равномерными температурами в течение всего года – не менее 20°–22 °С в среднем за каждый месяц. Сумма температур воздуха более 10 °С колеблется от 8000° до 11 000 °С. Вегетационный период круглогодичный. Тепловые ресурсы обеспечивают получение трех урожаев в год. В отличие от температурного режима количество и распределение осадков в тропиках варьирует в исключительно широких пределах (от менее 50 до 5000 мм в год). Именно фактор влажности в тропическом поясе – главная причина дифференциации почв. В пределах пояса выделяются три группы почвенно-биоклиматических областей: 1) влажные и переменновлажные леса; 2) засушливые ксерофитно-лесные и саванные; 3) полупустынные и пустынные области (рис. 10).

Тропические влажно-лесные области распространены на всех континентах и занимают около половины площади пояса. В почвенном покрове здесь преобладают красно-желтые ферраллитные и красные ферраллитные почвы. Процесс ферраллитизации заключается в глубоком преобразовании минеральной почвенной массы с разложением всех первичных минералов (кроме кварца), выносе продуктов разложения за пределы промываемой толщи и остаточной аккумуляции в ней кварца, каолинита, и гидроксидов железа и алюминия (гематит, гетит и гиббсит). Красные и желтые цвета сообщаются почвам гидроксидами железа. Ферраллитные почвы характеризуются кислой реакцией, низкой кати-

онообменной способностью, сравнительно небольшим содержанием гумуса с преобладанием в его составе фульвокислот. Красно-желтые ферраллитные почвы формируются под высокопродуктивными вечнозелеными влажно-тропическими лесами при постоянной круглогодичной температуре воздуха в 25–27 °С и большом количестве осадков (до 2500 мм в год и более). Красные ферраллитные почвы образуются под высокотравными саваннами и переменнo-влажными лесами при тех же термических условиях, что и красно-желтые почвы, но при меньшем количестве осадков (1300–1800 мм в год) ясно выраженном сухом сезоне до трех–четырех месяцев. Это способствует дегидратации оксидов железа, вследствие чего усиливается красный цвет почв и увеличивается образование в них железистых конкреций. Местами наблюдаются целые горизонты сцементированных железистых конкреций, получившие название латеритных горизонтов. При выходе на поверхность они образуют плотные железистые панцири. На известняках, мергелях и основных породах во влажных тропиках встречаются темно-красные лесные маргалитовые почвы. Они имеют название маргалитовых или ферраллитно-маргалитовых. Это плодородные почвы, занимающие, однако, небольшие площади. Значительные площади по обширным низинам и долинам рек (бассейн Амазонки, Конго и др.) занимают глеевые, аллювиальные и болотные почвы. Своеобразны мангровые засоленные почвы, формирующиеся в зоне прилива на океанических побережьях.

Тропические ксерофитно-лесные и саванные области имеют меньшую площадь, чем влажно-лесные, и распространены главным образом в восточном полушарии (рис. 10). В ПП этих областей выделяются две почвенные зоны: 1) зона коричнево-красных почв ксерофитных лесов и 2) зона красно-бурых почв сухих саванн. Коричнево-красные почвы распространены под сухими тропическими редколесьями и зарослями кустарников, где количество осадков около 1000 мм, а сухой сезон продолжается около шести месяцев. Минеральная часть коричнево-красных почв имеет преимущественно ферраллитный состав с преобладанием минералов каолининовой группы. В гумусовом горизонте содержится 3–4% гумуса гуматно-фульватного состава, реакция почв слабокислая, емкость поглощения катионов незначительная. В почвенной массе много железистых конкреций, а на поверхности почв часты железистые корки.

Красно-бурые почвы сухих саванн распространены в тех областях, где количество осадков варьирует от 300 до 800 мм при длительности сухого сезона шесть и более месяцев. В это время деревья сбрасывают листву, травяной покров выгорает, на поверхности почвы идет процесс быстрой минерализации растительных остатков. Минеральная часть красно-бурых почв имеет ферраллитный состав. Количество гумуса около 1%, реакция почв от слабокислой до слабощелочной, в нижней части профиля часто наблюдается иллювиально-карбонатный горизонт, поглощающий комплекс насыщен основанийми. Железистые конкреции образуются в меньших количествах, чем в коричнево-красных почвах. Среди коричнево-красных и красно-бурых почв встречаются черные слитые тропические почвы аналогичные черным слитым почвам субтропиков. Это наиболее плодородные почвы тропиков, широко используемые в земледелии особенно для выращивания хлопчатника и риса.

Тропические полупустыни и пустыни занимают около 1/4 площади тропического пояса. Они распространены на всех материках, кроме Северной Америки (рис. 10). В саваннах под разреженным низкотравным покровом формируются красновато-бурые почвы. Они мало гумусны, почти повсеместно карбонатные, имеют сиаллитный состав и слабо ожелезнены, чем объясняется красноватый оттенок их окраски. Почвы тропических пустынь также обладают красноваты-

ми тонами (на поверхности почвенных частиц при нагревания почвы до 60 °С и выше сохраняется гематит). В тропических пустынях и полупустынях преобладают суглинистые и щебнисто-каменистые карбонатные коры выветривания, часто ожелезненные. Меньшую площадь занимают песчаные пустыни, местами обызвесткованные и ожелезненные. В суглинистых, песчаных пустынях и полупустынях распространены засоленные почвы. Значительные площади занимают древние реликтовые ферраллитные коры выветривания, сформировавшиеся в прошлые геологические периоды в гумидных тропических условиях и перетолженные в последующее время. Такие отложения распространены в пустынях Австралии.

Земледельческая освоенность тропического пояса составляет 7%. Наиболее распаханы на равнинных территориях черные слитые, темно-красные маргалитовые, коричнево-красные, красно-бурые и пойменные почвы. В тропических областях развито горное земледелие. Коэффициент земледельческого использования некоторых горных почв выше, чем аналогичных почв на равнинах. Главные сельскохозяйственные культуры, возделываемые в тропиках – рис, сахарный тростник, хлопчатник, батат, кофе, какао, масличная пальма, каучуконосы, бананы, ананасы и др. Центральная проблема тропического земледелия – система удобрений. Специфической проблемой для тропиков является борьба с латеритообразованием. В отношении дальнейшего расширения земледелия тропический пояс обладает наибольшими резервами среди других поясов Земли.

Обзор современных мировых почвенных карт и схем почвенного районирования показывает сложность и разнообразие почвенного покрова на всех уровнях его организации. Рассмотрение почвенного покрова в тесной связи с условиями почвообразования и геологической историей территории выявляет эколого-географические закономерности структуры педосферы, объясняет ее генезис, географию и создает научную основу рационального использования и охраны земельных ресурсов мира. На каждом уровне организации ПП прослеживаются закономерности, которые отражают разные масштабы (время, площадь), воздействия факторов почвообразования.

В действительности, формирование почвенного покрова начинается в индивидуальной экосистеме и отражает историю и предысторию этой экосистемы.

---

---

## ЧАСТЬ II

---

---

# ФУНКЦИИ ПОЧВ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

## ВВЕДЕНИЕ

Как неотъемлемый компонент структуры наземных экосистем (БГЦ) почва выполняет множество экологических функций, обеспечивающих жизнь обитающих в почве и на почве растительных и животных организмов. Это дает право называть почву полифункциональной природной системой.

Экологические функции почвы в своем проявлении обусловлены наряду с морфологическими – физическими и химическими свойствами почв. Плотность почв, степень обводнения почвенных пор, доступность почвенной воды растениям и микроорганизмам, тепловой режим почв – определяют возможность существования на этой почве тех или иных растений, педофауны, микроорганизмов. В не меньшей степени влияют химический состав почв, концентрация растворимых солей, состав обменных катионов, кислотность почв, содержание и состав гумуса и т.п.

Биота, в какой-то мере являясь функцией окружающих условий, в том числе и почвы, в свою очередь меняет экологические функции почвы, усиливает или ослабляет их (роль растений в накоплении гумуса, в изменении порового пространства, в агрегированности почв, влияние червей, педофауны в целом, микроорганизмов на структуру почв, на доступность растениям питательных веществ и т.д.). Экологические функции биоты можно оценивать как способность изменять окружающие условия, и в том числе циклы химических элементов. Биота усиливает миграцию одних элементов и замедляет или закрепляет другие. Именно поэтому экологические функции биоты оцениваются ниже с точки зрения изменения экологических функций их среды обитания – почвы, в рамках экологических функций экосистемы в целом.

Кроме традиционно изучаемых физических, химических и биологических функций почв, в наш век все большее внимание уделяется информационным функциям почв. Особенно интересной оказалась способность почвы сохранять в своем составе, строении и свойствах свидетельство о прошлых временах и эпохах почвообразования. Эта информационная функция почвы все чаще используется в палеопочвоведении, палеогеографии, археологии и истории человеческого общества.

Современный почвенный покров планеты представляет собой сложную систему, состоящую из почв – компонентов естественных экосистем и почв разной степени нарушенности, почвоподобных тел, искусственных почв и разной степени рекультивированных отвалов. Различия в почвенном покрове отражают деление биосферы на собственно биосферу и техносферу, экосистемы, созданные человеком и для человека. Как уже говорилось выше, все антропоген-



ные почвы ограничены в своих экологических функциях в результате хозяйственной деятельности человека. Биосфера поддерживает биоразнообразие; техносфера, как среда, созданная человеком, стремится оставить или создать только те организмы, которые необходимы для жизни человека. И хотя уже появилось понимание о необходимости сохранить генофонд планеты, пока реальная действительность показывает, что биоразнообразие стремительно сокращается в результате отчуждения почв из биосферы в техносферу со всеми последствиями этого отчуждения.

## *Глава 1*

### **ПОЧВА КАК БИОКОСНАЯ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА. РАЗНООБРАЗИЕ И ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОЧВЕННЫХ ЭКОФУНКЦИЙ**

При обсуждении структурно-функциональной роли почв в наземных экосистемах и биосфере в целом необходимо уяснить характер системной организации почвы, определяющей выполнение ею многочисленных экологических функций. Задача эта до сих пор не имеет однозначной трактовки.

Например, нет единства в вопросе, что считать почвой, какой объем она занимает в пространстве, где проходит ее нижняя граница и какие параметры определяют ее полифункциональность.

Не случайно появление значительного числа публикаций по данному кругу вопросов.

Одна из главных черт публикаций – тенденция к изменению объема понятия почва, усиление функционально-экологического ее содержания, подтверждение мысли В.И. Вернадского об отнесении почвы к особому классу биокосных природных систем. Последнее положение было реализовано в ряде конкретных предложений, среди которых следует прежде всего отметить взгляд на почву как на четырехфазную систему, состоящую из твердой, жидкой, газообразной фаз и живых организмов. Такой смелый методологический ход вызвал, однако, серьезные возражения у многих почвоведов. Появились критические высказывания, поскольку новая трактовка почвы расходилась с восприятием ее Докучаевым как результата взаимодействия факторов почвообразования, включая живые организмы, для которых сформировавшаяся почва выступает как среда их обитания.

Возникла необходимость в новом обобщающем подходе, который учитывал бы позитивные стороны определения почвы как четырехфазной системы, и, в то же время, сохранял докучаевское понимание ее. Нами было предложено решение, основанное на признании особого природного образования биопедоценоза (или педосистемы), охарактеризованного в ряде работ.

**Б и о п е д о ц е н о з** (п е д о с и с т е м а) в нашей трактовке представляет собой динамическое единство почвы и населяющих ее живых организмов и корней. В определенном смысле он близок к почве в понимании ученых, выделяющих в ней живую фазу как составную часть. Признание биопедоценоза в качестве особого образования позволяет значительно полнее и рельефно воспринимать почву как биокосную систему со многими экологическими функциями.

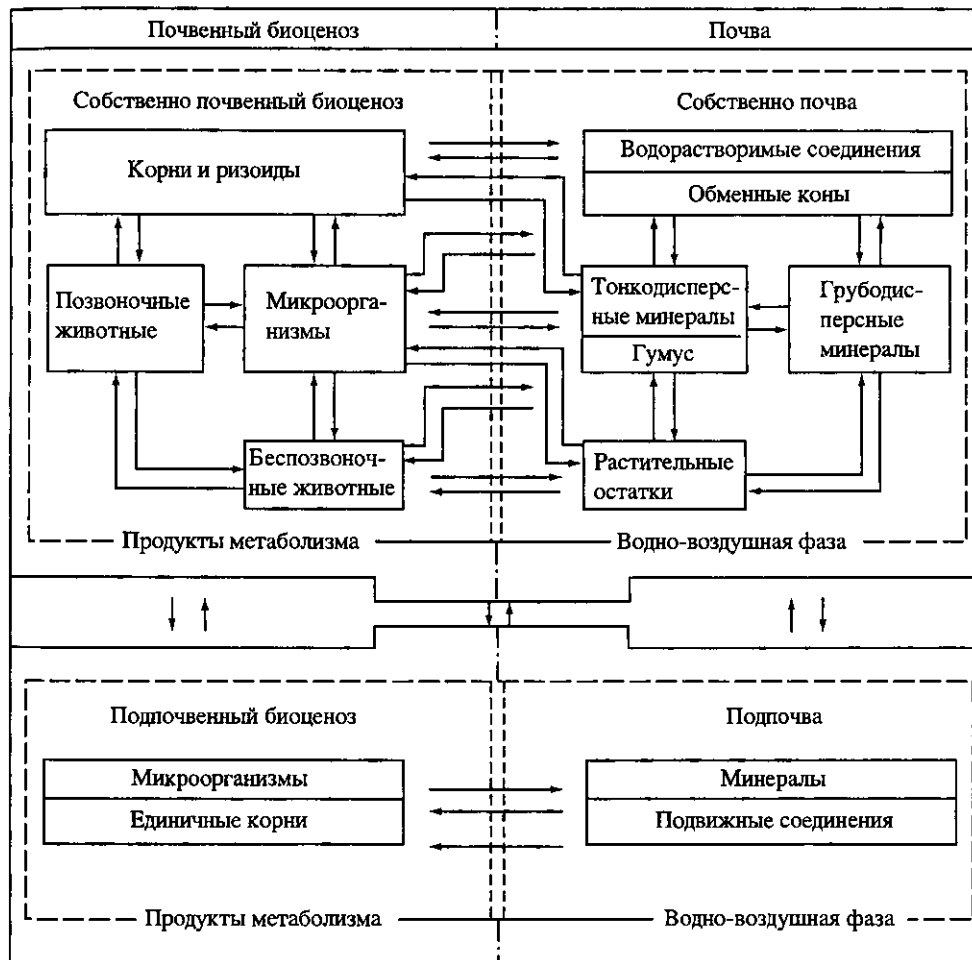


Рис 11. Структурная модель биогеоценоза

В биопедоценозе выделяются следующие основные блоки: собственно почва и подпочва, в совокупности образующие макропочву; собственно почвенный и подпочвенный биоценоз, вместе составляющие биоценоз почвы (рис. 11). Собственно почва представляет собой почву в классическом докучаевском понимании. Ее нижняя граница определяется нижней границей активного проявления почвообразовательного процесса, или “деятельным слоем почвообразования”, по терминологии И.П. Герасимова. Собственно почвенный биоценоз – это совокупность корней, ризоидов и всех живых организмов, обитающих в деятельном слое почвы. Подпочва – прилегающие к собственному профилю горизонты с ослабленными признаками почвообразования. Биоценоз подпочвы составляют обитающие в ней живые организмы и единичные корни.

Целесообразность и правомочность включения в биопедоценоз не только собственно почвы и ее биоценоза, но и подпочвы с поселяющимися в ней живыми организмами диктуется рядом фактов. В первую очередь проявлением признаков почвообразования на большой глубине и проникновением многих живых организмов на глубину, значительно повышающую мощность деятельного слоя почвы, обычно ограниченного 1–1,5 м. Ряд признаков почвообразования про-

слеживается глубже 4 м, а корни травянистых растений могут проникать до 5–10 м.

Совместное рассмотрение и изучение почвы и подпочвы, а также сообщества населяющих их организмов – давно назревшая задача, попытки решения которой предпринимались неоднократно. Так, Г.Н. Высоцким была выдвинута идея о глубокопрофильном (полнопрофильном) почвоведении и обоснована необходимость детального изучения всей толщи, охваченной почвообразованием. Почвообразование часто распространяется на большую глубину, чем это принято считать, и полный почвенный профиль должен включать в себя совокупность всех горизонтов, в которых отмечается развитие корней.

Важность полнопрофильных исследований доказывается не только общими соображениями, но и конкретными работами почвоведов. Но широкого размаха они до сих пор не получили, что объясняется отсутствием теоретического обоснования необходимости их проведения. Концепция биопедоценоза устранила данный пробел. Она позволяет также корректно решить вопрос о расширении объема понятия “почва” и выделении “живой” фазы почв.

Приведенная схематическая модель биопедоценоза свидетельствует о большой сложности и насыщенности специфическими связями как собственно почвенной, так и биоценотической ее составляющих. В рассматриваемой схеме в качестве основных структурно-функциональных почвенных компонентов выделяются: 1) водорастворимые соединения и обменные ионы, 2) тонкодисперсные минералы и гумус, 3) растительные остатки, 4) грубодисперсные минералы, 5) водно-воздушная фаза. Составляющими биоценоза почв служат: 1) корни растений и ризоиды, 2) микроорганизмы, 3) беспозвоночные и 4) позвоночные животные, 5) продукты метаболизма живых организмов.

Простой перечень и элементарная группировка (рис. 11) основных звеньев почвенного и биоценотического блока биопедоценоза свидетельствуют о их тесном взаимодействии и наличии отчетливой специфичности, заставляющей постоянно учитывать их качественное своеобразие. Именно это обстоятельство сильно затрудняет решение вопроса о расширении объема понятия “почва” простым выделением в ее состав еще одного компонента “фазы живых организмов”. Этот компонент оказывается слишком гетерогенным, насыщенным связями и взаимодействиями разных порядков. По специфичности и сложности как почвенный биоценоз, так и почва, вполне могут рассматриваться как особые системы, входящие в состав природного образования более высокой организации – биопедоценоза. Сам биопедоценоз – не автономная система, а входит в состав другой, еще более сложной системы – биогеоценоза (экосистемы).

Такое вычленение сразу нескольких иерархических систем соответствует принципам системного подхода, т.е. позволяет фиксировать как качественное своеобразие объектов, так и возникновение более сложной системной организации. Введение понятия биопедоценоза позволяет сохранить докучаевское понимание почвы, и признать необходимость постоянного учета ее взаимосвязей с населяющими его организмами. Оно облегчает восприятие почвы как биокосной полифункциональной системы.

Развитие концепции биопедоценоза (педосистемы) в определенной мере способствует также решению вопросов, связанных с методическими разработками и постановкой новых исследовательских задач.

Так, она помогает установить нижнюю границу почвы, однозначное определение которой до сих пор отсутствует. При решении вопроса о границах какого-либо природного образования можно за таковые принять границы структурных компонентов или проявления процессов, формирующих его. Определение

нижней границы почвы по ее структурным составляющим обычно сопряжено со значительными трудностями из-за наличия общих черт в морфологии и вещественном составе нижних горизонтов почвы и прилегающей к ней коры выветривания. Поэтому лучше, на наш взгляд, определять нижнюю границу почвы по пространственной локализации процессов, непосредственно ее образующих. Среди таких процессов в первую очередь должно учитываться поступление веществ из собственно почвы в подпочву. Там, где прекращается это поступление, вероятно, и проходит нижняя граница почвенного тела. Обычно за такую границу принимается глубина распространения корней. С этим можно согласиться, если имеются в виду полноразвитые ненарушенные почвы, заселенные высшей естественной растительностью с глубокой корневой системой. Но для многих окультуренных и некоторых целинных почв этот критерий недостаточен из-за поверхностного расположения корней растений. Так, по корням нельзя провести нижнюю границу почвы в пахотных почвах, подзолистых почвах, мертвопокровных ельниках.

Использование понятия и разработка модели биопедагогизации (педосистемы) существенны для выявления многообразия экологических функций почв – следствия системной организации почвы и ее биокосной природы.

Понятие “функция” применительно к почвам стало широко использоваться в последние годы. Ранее оно было освоено в других науках, например, в биологии. Так, физиологическая функция определяется как “осуществление человеком, животными и растительными организмами различных отправлений, обеспечивающих их жизнедеятельность и приспособление к условиям окружающей среды” [БСЭ. Т.28. С. 131]. Понятие “функция” в общем виде определяется как 1) явление, зависящее от другого и изменяющееся по мере изменения этого другого явления; 2) работа, производимая органом, организмом, системой; 3) роль, значение чего-нибудь. Именно второе определение термина “функция” применительно к почвам принято в статье.

Функции почв в наземных экосистемах и биосфере (почвенные экофункции) отражают роль и значение почв и почвенных процессов в жизни указанных объектов, в их сохранении, восстановлении и эволюции. Переходя к обзору представлений об экофункциях почв, необходимо отметить, что они пережили определенную эволюцию. На первом этапе развития учения о почвенных экологических функциях в 1970–1980-е гг. важно было выявить их основное разнообразие и дать теоретическое обобщение накопленных к этому времени фактов, опираясь на идеи В.В. Докучаева, В.И. Вернадского, Б.Б. Польшова, М.С. Гилярова, В.А. Ковды и др.

В результате проделанной работы была создана первая классификация биогеноценотических (экосистемных) и глобальных функций почв, систематизированы известные и вновь установленные экофункции, заложены основы использования и охраны почв с учетом их экофункций.

Была расширена трактовка почв в эколого-функциональном отношении. В дальнейшем развитии рассматриваемого учения пошло по пути углубленного анализа функций почв в наземных экосистемах и биосфере и профессиональной разработки отдельных разделов учения ведущими исследователями.

Большой интерес к проблеме почвенных экофункций неизбежно породил усложнение ее содержания, модернизацию используемых подходов и понятий.

Однако первые обобщающие работы до сих пор являются базовыми для дальнейшей разработки всей рассматриваемой проблемы. Поэтому при освещении вопроса об экологических функциях почв мы будем опираться именно на эти работы с учетом того нового, что получено и другими авторами.

Все экологические функции почв можно подразделить на две категории: 1) экосистемные (биогеоценологические) и 2) глобальные (биосферные и этносферные). В настоящем разделе целесообразно дать краткий обзор и смысловую трактовку обеих категорий, сделав акцент на экосистемных функциях, другие категории экотипов оказываются производными от экосистемных функций.

Почвенные биогеоценологические функции в экосистемах характеризуются в действительности широким набором, далеко превосходящим перечень форм участия почвы в биогеоценологических процессах, которыми обычно ограничиваются при общей оценке экологической роли почв.

До недавнего времени почве, как правило, приписывали лишь функцию источника питания и механической опоры для живых организмов. Вместе с тем проведенный специальный анализ выявил более десяти функций, каждая из которых играет существенную роль в процессах, происходящих в наземных экосистемах (рис. 12). Однако до сих пор на практике продолжает иметь место односторонний, по существу, монофункциональный подход к почве, который во многих случаях способствует выработке примитивных способов хозяйствования на земле. Данным обстоятельством во многом можно объяснить односторонность рекомендаций по повышению урожайности полей России в 1980-е гг. Тогда из более чем сорока видов мелиораций на вооружение брались лишь химические и водные мелиорации, максимизировавшие лишь почвенную функцию источника элементов питания, но тем самым негативно влияя на осуществление других почвенных экотипов, тесно связанных между собой.

В предлагаемой концептуальной модели и классификации все экосистемные функции разбиты на четыре вертикальных ряда, объединяющие в себе функции, контролируемые определенными свойствами и параметрами почв (рис. 12).

Первый ряд – функции, связанные с физическими свойствами почвы: ее температурой, теплопроводностью, плотностью, пространственной протяженностью и т.д. В этой группе заслуживает прежде всего внимания такая важнейшая функция почв как функция жизненного пространства (рис. 12).

Одной из главных причин, ограничивающих распространение большей части видов живых организмов, является отсутствие свободной и пригодной для расселения материальной среды, где они могли бы беспрепятственно размножаться и развиваться. В силу этого обстоятельства на Земле в каждый момент времени существует лишь незначительная часть особей большинства видов по сравнению с потенциальным их количеством, которое могло бы появиться в случае снятия лимитирующих факторов. В.И. Вернадским было показано, что при сохранении всех появляющихся особей, бактерии покрыли бы сплошным ковром всю планету в течение полутора суток, а такие медленно размножающиеся животные как слоны, – за несколько столетий.

Этого не происходит в силу острейшей конкуренции между различными видами и отсутствия подходящих условий на значительных пространствах нашей планеты. Тем не менее живые организмы постоянно стремятся освоить все новые и новые местообитания. По мнению В.И. Вернадского "...область жизни, по-видимому, расширяется в геологическом времени, и во всяком случае несомненно, что она всегда охватывает или стремится охватить до конца все доступное ей пространство на протяжении, вероятно, всей геологической истории". Поэтому не случайно, что в процессе эволюции жизнь вышла из моря на сушу и постепенно освоила почти всю ее поверхностную оболочку. В ходе этого освоения возникла почвенная сфера Земли, где обитает огромное количество ви-

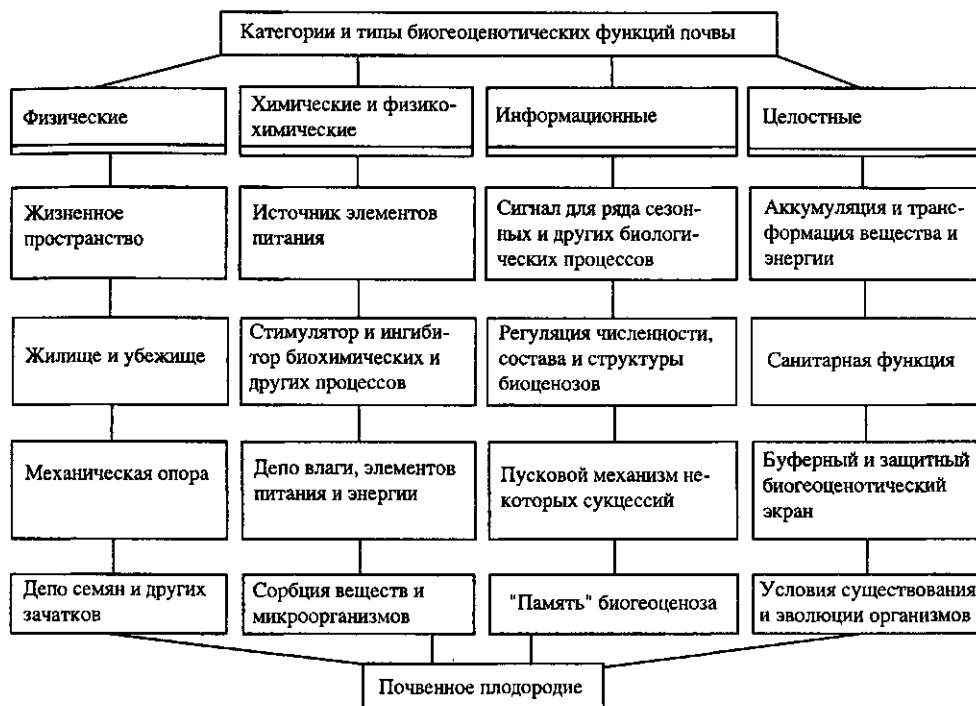


Рис. 12. Экосистемные (биогеоценотические) функции почвы

дов. Например, более 90% насекомых – этой самой представительной группы животных, на долю которых приходится примерно половина всех видов животных Земли (более одного миллиона), проводят тот или иной период жизни в почвах. В почве сосредоточена большая часть зоомассы ландшафтов суши. Это связано с относительно редкой встречаемостью видов животных, живущих на поверхности литосферы и в воздушной оболочке, и высокой плотностью почвенного населения.

То, что почвы выполняют функцию жизненного пространства, совершенно необходимо учитывать при разработке целого ряда теоретических и практических вопросов. Следует помнить о том, что застройка и хозяйственное освоение крупных земельных массивов может приводить к гибели или миграции почвенных живых существ. Так, в результате сведения лесов произошло значительное продвижение на север некоторых землероев степной зоны.

Другая важная биогеоценотическая функция почв, тесно охарактеризованной выше, – функция жилища, благодаря которой почва оказывается не простоместилищем живых организмов, но и благоустроенным домом, защищающим их от переохлаждения и перегрева. Этому способствует прежде всего то, что температура и влажность воздуха в почве подвержены менее резким колебаниям, чем на поверхности Земли. При хозяйственном освоении и использовании земель о данной функции почв также необходимо помнить и стараться не нарушить ее. Землепользование ухудшает баланс питательных элементов, водный режим почв, и делает их непригодными для обитания многих живущих в них организмов.

К первой группе биогеоценотических функций почв относится также опорная функция, которая позволяет растениям сохранить вертикальное положение,

быть устойчивым к ветровалам и противодействовать силе тяжести. Значение этой функции учитывается пока недостаточно. В то же время полноценные знания о ней помогут понять многие явления в жизни растений и животных.

Особую группу образуют биогеоценологические функции почв, связанные с их химическими свойствами, в первую очередь, функция источника элементов питания. Это одна из наиболее важных и хорошо известных функций почв. От нее зависит само существование большей части организмов суши, так как химические элементы почвы идут на построение тканей растений и многих микроорганизмов, принимают участие в целом ряде сложнейших биохимических процессов.

Сущность функции – почва – депо влаги и элементов питания в том, что в почве имеется резерв названных компонентов, который используется организмами при расходе легкодоступных запасов. Пищевое депо образуют минеральные соединения, законсервированные в кристаллических решетках и скоагулированные гумусовых кислотах, подвижные соединения и влага, находящиеся в глубоких горизонтах, и др. Депо обеспечивает существование организмов несмотря на периодически возникающие перерывы в поступлении в почву влаги, тепла, растительного опада, удобрений. Это залог устойчивости почвенного плодородия и поддержания необходимых условий существования живых организмов. Когда почвенное депо невелико, в снабжении организмов часто наступают резкие перебои. На таких почвах живут в основном виды, приспособленные к резким колебаниям гидротермического и пищевого режимов. Примером почв со слабо развитым депо являются таежные на однородных песках, занятых сосной обыкновенной. Ко второй группе относят также функции катализатора и ингибитора ряда почвенных биохимических процессов. Эта функция осуществляется благодаря ряду ферментов и абиотических катализаторов, которые усиливают или ослабляют почвенные биохимические процессы.

Почва представляет собой тонкодисперсную систему, обладающую поверхностно-активными силами, возникающими на границе раздела почвенных коллоидов и окружающей их дисперсионной среды. Благодаря этим силам почва способна задерживать многие соединения, поступающие в нее с атмосферными осадками и пылью. Лабораторные опыты с фильтрованием коллоидальных растворов через почвенный мелкозем показывают, что подавляющая часть фильтруемых компонентов задерживается уже в верхних слоях.

Почва активно сорбирует не только коллоидальный материал, но и молекулярно-растворимые соединения, многие из которых переходят в состояние обменного поглощения на поверхности тонкодисперсной коллоидальной фазы почв. Сорбционная способность почв пока еще мало учитывается в почвоведении и практике. Но благодаря удержанию почвенно-растительным покровом соединений, поступающих с атмосферными осадками и пылью, организмы могут существовать на почвах с низким плодородием.

Сорбционная функция почв выражается не только в захвате почвой поступающих в нее соединений, но и в удержании на поверхности коллоидных частиц почвенных микроорганизмов. Эта функция имеет исключительно важное значение, так как в случае ее отсутствия большая часть микроорганизмов, по-видимому, уносилась бы за пределы почвенного профиля с нисходящим током влаги. Учет способности почв к сорбции микроорганизмов помогает полнее понять многие стороны биологических процессов почвообразования и распределения микроорганизмов по почвенному профилю.

Выделяют биогеоценологические функции почв, связанные с ее информационными свойствами. В последнее время почва все чаще рассматривается как ин-

формационная система, способная “передать” населяющим ее биоценозам информацию о состоянии среды обитания.

Благодаря информационным свойствам почва может “давать” своего рода сигналы для ряда сезонных биологических процессов. Так, в условиях северной тайги европейской России ведущим фактором пробуждения роста корней в ельнике чернично-зеленомошном является температура почвы. В связи с этим на более холодных затопляемых талыми водами почвах рост ели задерживается на 10–20 дней, несмотря на то, что температура воздуха благоприятствует вегетации. Кроме температуры в качестве сигналов, регулирующих сезонное развитие организмов, может также выступать водный и солевой режим почв.

Другой биогеоценотической функцией почв, основанной на их информационных свойствах, является функция пускового механизма некоторых сукцессий растительного покрова.

В качестве самостоятельной группы следует выделить биогеоценотические функции почвы, базирующиеся на ее целостных свойствах и процессах, включающих в себя систему взаимосвязанных частных свойств и процессов. В этой группе в числе первых должна быть названа трансформация вещества, поступающего в биогеоценоз или находящегося в нем. Благодаря этой функции во многом осуществляется такой грандиозный по своим масштабам процесс, как преобразование первоначально почти бесплодных горных пород поверхностного слоя литосферы в пригодный для жизни многочисленных видов организмов субстрат. К этой же группе следует отнести функцию защитного и буферного экрана биогеоценозов Земли, предохраняющего их от разрушающего действия эрозии, ухода биологически ценных газообразных соединений из подпочвенных и почвенных слоев в атмосферу, потери элементов питания с нисходящим током влаги, резких колебаний гидротермического и пищевого режимов и др.

Весьма существенной, но пока еще недостаточно изученной функцией почв, является ее роль как фактора эволюции организмов суши Земли. Вывод о реальности такой функции подтверждается фундаментальными исследованиями М.С. Гилярова и его школы, а также И.И. Шмальгаузена и др., раскрывающими роль почв в эволюции насекомых и других животных.

Итогом возникновения и взаимодействия между собой охарактеризованных функций является то, что почва в конечном счете стала важнейшим условием существования жизни на Земле. Можно без преувеличения сказать, что жизнь на континентах планеты в ее современной форме была бы невозможна без развитого почвенного покрова, как оказалось бы невозможным существование почвенной оболочки Земли в случае уничтожения растительного мира или мира почвообитающих животных и микроорганизмов. Возникнув в ходе единого процесса становления и развития биосферы, эти природные феномены стали неразрывными в своем дальнейшем существовании и эволюции. Поэтому такое огромное значение приобретает познание почвы и населяющих ее живых организмов в их единстве и взаимодействии, фиксируемых в концепции биопедоценоза и учении о почвенных экофункциях, составной частью которого являются представления не только о биогеоценотических, но и глобальных функциях почв – литосферных, атмосферных, гидросферных и др.

Особо следует отметить общебиосферные функции почвенной оболочки, в ходе реализации которых почва выступает как среда обитания, аккумулятор и источник вещества для организации суши, связующее звено биологического и геологического круговоротов и планетарная мембрана, защитный барьер и условие нормального функционирования биосферы и др.



К категории глобальных относятся такие функции в системе взаимодействия “общество – природа”, или этносферные функции почвенного покрова, привлекающие в последние годы все большее внимание в связи с установлением Л.Н. Гумилевым особой роли биосферы и ее компонентов в земном этногенезе.

Итак, для почвы свойственна ярко выраженная полифункциональность в системе биогеоценологических и биосферных взаимодействий, проявляющаяся в наличии нескольких категорий почвенных экофункций и многочисленности их видов, что заставляет заново пересмотреть укоренившиеся односторонние трактовки роли почвы в жизни природы и общества.

## Глава 2

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИЙ ПОЧВ

В последнее время все чаще ряд исследователей дает определение почвы через ее функции. В частности, качество почв нередко определяют как “способность почвы осуществлять ее функции”. Ниже будет использован такой, чисто функциональный, подход к почве. Следуя этим определениям, физика почв – наука, изучающая физические основы осуществления почвами их функций. Рассматривая все многообразие функций почв в биосфере и экосистемах остановимся лишь на ее трех, на наш взгляд, главных: 1) основа биологической продуктивности; 2) качество окружающей среды, прежде всего в отношении здоровья растений и животных (человека), о чем к сожалению, не часто упоминают; 3) сохранение и поддержание биоразнообразия. Так, упростив и сузив предмет изучения, попытаемся выделить роль и значение физических свойств и процессов в отношении указанных основных функций почв в биосфере.

Прежде всего определим тот физический образ (модель) почвы, с помощью которого возможно решение поставленной задачи. С точки зрения физики, почва – это природная система, обладающая:

- 1) верхней и нижней границами;
- 2) изменяющимися в пространстве свойствами проводимости, накопления вещества и энергии;
- 3) физико-химическими свойствами, присущими гетерогенной полидисперсной многофазной системе (сорбция/десорбция, высокая поверхностная энергия, лиофильность/лиофобность, реологические характеристики и др.).

Физические свойства почвы, определяющие удержание и трансформацию веществ и поступающей тепловой энергии, характеризуют ее агрофизическое значение – как основу биопродуктивности (почвофункция 1). На верхней и нижней границах почвы наблюдаются процессы, которым в основном и приписывается экологическое (т.е. в отношении взаимосвязей с контактирующими компонентами экосистемы) значение: это потоки газов, веществ (прежде всего воды), энергии, которые имеют как вне-, так и внутрипочвенное направление. Эти потоки и определяют вещественные связи почвы с другими компонентами экосистемы. Физические характеристики этих потоков, возможность их количественного описания, оценки и прогноза лежат в основе почвенной функции (2), определяющей “нормальное, здоровое” функционирование биосферы. В определении также подчеркнута и пространственная изменчивость всех почвенных свойств и режимов. По-видимому, это одно из важнейших свойств почв, определяющих и поддерживающих биоразнообразие. Действительно, если почва (точ-

нее почвенный покров) на своем даже небольшом протяжении способна “предоставить условия” для различающихся по требованиям организмам (аэробным, анаэробным, ксерофитным и пр.), то почва и является центральным по значению элементом в поддержании биоразнообразия (почвофункция 3). Однако приведенные определения и разъяснения выглядят во многом заявочными, малообоснованными. Возникает множество фундаментальных вопросов. Действительно, в какой мере именно физические условия и процессы определяют биопродуктивность (в сравнении с условиями наличия питательных веществ, почвенной органики, кислотности и пр.)? Почему именно физические характеристики потоков веществ и энергии определяют ее экологические функции? В какой мере физические факторы способствуют разнообразию условий и, главное, устойчивости этого разнообразия? Заранее представляя все-таки несколько односторонний взгляд на поставленные проблемы, постараемся подтвердить приведенные выше положения фактическими материалами.

Итак, почвенная функция 1 – *биологическая продуктивность*.

Именно эта почвенная функция исследована в наибольшей степени, именно на нее обращали и обращают внимание ученые и практики сельскохозяйственного производства. Роль физических факторов неоднократно подчеркивалась многими исследователями. Достаточно вспомнить таких исследователей как А.Г. Дояренко, А.Ф. Иоффе, Н.А. Качинский, И.Б. Ревут, А.Д. Воронин, В.В. Медведев и др. Значение почвенно-физических условий для растений по сравнению с минеральными удобрениями весьма энергично и образно подчеркивал А.Г. Дояренко еще в 1933 г. “Что же касается искусственных туков, то они никоим образом не могут считаться удобрениями, так как ни в какой степени не улучшают почвы и не воздействуют на почву, а являются прямым “искусственным питанием растения” (все равно как благотворительная кормежка голодных не улучшает условий их существования)”. Работы этих ученых послужили основой для формирования науки “агрофизики”, целью которой (в отличие от физики почв) является изучение влияния факторов внешней среды на продуктивность агроценозов.

В соответствии с целями и направленностью данной статьи хотелось бы подчеркнуть лишь некоторые моменты, кажущиеся определяющими в рамках рассмотрения физических основ почвенных функций. Среди агрофизических факторов рассматривают все множество физических свойств, часто не задаваясь вопросом, а каков механизм влияния того иного фактора на биопродуктивность. В частности, каков механизм влияния структуры (в виде агрегатного состава) или плотности почвы на урожай? Прямого воздействия структура на продуктивность, по-видимому, не оказывает, хотя такого рода зависимости нередко можно встретить в литературе. Опять-таки в рамках данного рассмотрения, имеет смысл разделить физические условия на два типа: 1) оказывающие прямое воздействие и 2) проявляющиеся через формирование водно-воздушного и теплового режимов. К первым будет отнесен прежде всего основной параметр, формирующий развитие корней, – сопротивление пенетрации. Через его воздействие на корневую систему, опосредованно, будет оказывать влияние влажность почвы, плотность, гранулометрический состав и др. физические свойства. Подтверждение доминирующего прямого воздействия этого фактора можно найти в многочисленных работах.

И все-таки определяющее значение на продуктивность оказывают факторы, формирующие водно-воздушный и тепловой почвенно-физические режимы. Именно оптимальные водно-воздушный и тепловой почвенные режимы при поступлении достаточного количества лучистой энергии формируют мак-



Рис. 13. “Транспирационная трапеция” – зависимость относительной транспирации (или относительного урожая) от матричного давления влаги (в единицах рF)

симальную биопродуктивность в зоне тропических лесов. В других зонах только на фоне благоприятных почвенно-физических режимов возможно повышение продуктивности за счет удобрений. Естественен следующий вопрос, а знаем ли мы, хотя бы теоретически, необходимый оптимум почвенно-физических режимов? К настоящему времени этот оптимум достаточно хорошо обоснован. Его можно проиллюстрировать на следующей теоретической схеме влияния водно-воздушного режима на урожай (рис. 13). По оси ординат отложим относительный урожай (отношение реального к максимально возможному при прочих равных условиях) или связанную с ним относительную транспирацию, а по оси абсцисс – давление влаги, являющееся характеристикой доступности почвенной влаги для растений. Кривая, описывающая функцию продуктивности схематично, будет иметь вид трапеции, нередко так и называемой “транспирационной трапеции”. Плато этой “трапеции”, определяющее максимальную (относительный урожай равен 1) продуктивность, будет соответствовать определенному диапазону давлений влаги.

Этот диапазон, очевидно, и будет определять оптимальные водно-воздушные условия в почве. А значения давления влаги (в единицах рF) – это “критические значения” водно-воздушного режима почв. Первая по оси абсцисс – давление входа воздуха в почву, “давление барботирования” ( $P_{\text{барботирования}}$ ). До наступления этой величины в почве наблюдаются анаэробные условия, сказывается недостаток воздуха. И напротив, после достижения второй “критической” точки ( $P_{\text{крит.}}$ ) растения будут испытывать недостаток влаги. Уменьшение подтока почвенной влаги к корням приведет к сужению устьичного пространства, замедлению диффузии  $\text{CO}_2$  в лист, фотосинтеза и, в конечном итоге, урожая. Задача мелиорации почв – поддерживать давление влаги в корнеобитаемой зоне в указанных пределах давлений влаги. Ниже давления барботирования – осушительной, выше второго “критического давления” – оросительной. Таковы теоретические предпосылки для оптимизации водно-воздушного режима. Аналогичные “трапеции” продуктивности могут быть получены и проанализированы в отношении “критических” значений и для теплового режима почв.

В связи с проведенным анализом, показывающим главенствующее значение физических режимов (водного, воздушного, теплового) в формировании физических основ биопродуктивности почв, возникает и подход, предлагающий использовать критические параметры указанных режимов для оценки оптимальности физических факторов. Действительно, если мы будем знать частоту встречаемости обоих критических значений давления влаги в корнеобитаемой

толще почвы, то это и будет количественная агрофизическая характеристика почвы. Такой подход был применен для оценки продуктивности на примере чернозема южного (Оренбургская обл.). На четырех участках площадью 100 м<sup>2</sup> выращивалась люцерна на зеленую массу. Участки находились на расстоянии 10–15 м друг от друга и по всем почвенным и сельскохозяйственным условиям были идентичны. Перед экспериментом люцерна была скошена. На участки были поданы различные нормы полива: без орошения, 28, 47, 64 и 82 мм (контроль). Контроль принимался за оптимальный водный режим и достигался поддержанием давления влаги выше второго критического. Предварительные специальные эксперименты показали, что давление барботирования для данных черноземов изменяется от 1,505 до 1,681 единиц рF для глубин от 10 до 80 см, а критическое давление, определяющее условия засушливости, от 2,813 до 2,602 единиц рF. За межюкосный период проводили наблюдения за давлением влаги. Затем полученный (более месяца наблюдений, 37 дат) массив данных по послыному давлению влаги обрабатывали следующим образом: все даты обоснованно (по критерию Уилки–Шапиро) рассматривали как нормально распределенный массив данных, по этим данным восстанавливали теоретический вид этого распределения и находили вероятность появления “критических значений”. На рис. 14 приведена зависимость относительной биомассы (относительно контроля, принятого за 1) от вероятности появления второго критического значения давления влаги; давление влаги выше барботирования не было достигнуто. Из этого рис. 14 видно, что предлагаемый критерий оценки оптимальности почвенно-физических режимов – объективная количественная информация для агрофизической оценки почв: зависимость имеет вид, близкий к линейному с высокой степенью достоверности коэффициента корреляции. Это позволяет использовать такого рода зависимость как для реальной, так и для прогнозной оценки физического состояния почв с точки зрения осуществления почвой ее функции “биопродуктивность”. Данный вероятностный агрофизический подход более подробно рассмотрен в современных работах физиков почв.

Вторая почвенная функция – *ответственность за качество окружающей среды (прежде всего в отношении здоровья растений, животных, человека)*. Эта почвенная функция связана со способностью почвы сорбировать/десорбировать, трансформировать, пропускать различные и прежде всего загрязняющие вещества. Попытаемся рассмотреть дальнейшие направления в исследовании этой функции почвы, опираясь не на традиционные понятия о предельно допустимых концентрациях и других установленных пределах. Попытаемся проанализировать эту функцию почвы с позиций быстро прогрессирующего подхода – оценки риска для “здоровья” окружающей среды.

В современном понимании, риск – вероятность появления неблагоприятного события. С другой стороны (экономической), риск – это максимальный ущерб, нанесенный этим событием, и вероятность связанных с ним потерь. Повидимому, в отношении почвенных функций, риск – это вероятность появления зарегистрированных биоаномальных случаев, имеющих этиологию, связанную с почвой. Практически это означает, что даже если на данный момент мы и не имеем в рассматриваемом регионе случаев заболеваний, вероятность их появления все же имеется, так как имеется возможность попадания в биоциклы токсических веществ. Эта вероятность увеличится, если, например, вносить пестициды, построить тепловую станцию и пр. Как видим, подход этот прогнозный, ориентированный именно на *прогнозирование*, а не на *регистрацию* уже создавшейся (!) ситуации. При этом подходе центральное значение приобретают прогнозные модели переноса веществ и энергии в почве и ландшафте. Каковы

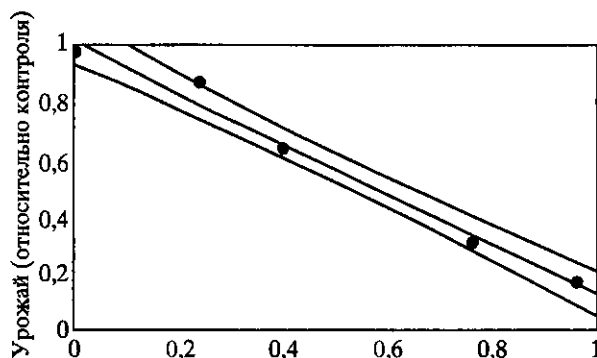


Рис. 14. Зависимость урожая люцерны (относительные единицы) от вероятности появления давления влаги больше  $P$  критического (абсолютные значения)

же состояние и перспективы развития прогнозных математических моделей и роль в этом процессе физических свойств и процессов.

Следует отметить, что в настоящее время математических агроэкологических моделей разработано весьма много. Большинство моделей являются физически обоснованными (или полуэмпирическими в отличие от эмпирических и стохастических). В основе их функционирования лежат фундаментальные физические законы (закон сохранения вещества и энергии, феноменологический закон переноса), а также ряд специфических почвенных физических явлений (гидродинамическая дисперсия, нерастворяющийся объем и др.). Кроме того, большинство распространенных моделей имеют весьма совершенные программы, рассчитанные на быстродействующие ЭВМ, свои банки данных по экспериментальному обеспечению в виде основных почвенных гидрофизических функций и ряд других усовершенствований. Все это позволяет использовать эти модели для прогнозных исследовательских работ, управления хозяйством, расчета риска. Однако нередко и эти весьма совершенные модели дают сбои. Почему, постараемся разобраться на примере.

В течение ряда лет, с 1994 по 1998 гг., на Почвенном стационаре МГУ проводились детальные водно-режимные исследования на больших лизиметрах, размерами  $3 \times 3 \times 1,75$  м. Объектами исследования были дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы с разными системами обработки и с соответствующим строением профиля: вариант "глубокий плантаж" – гор. В2 (0–43 см), В1 (43–65), А2 (65–80), Апах (80–100), В2 (100–120), В3 (120–150 см) и вариант "мелиоративная вспашка" – Апах (0–20), В1 (20–45), А2 (45–60), В2 (60–120), В3 (120–150 см). Отметим принципиальное отличие этих вариантов: вариант "глубокий плантаж" имел на поверхности гор. В2, который за время существования лизиметров (35 лет) хотя и изменил свои свойства, однако сохранил характерные для этого горизонта особенности в виде трещиноватости, глыбистости и пр. На этих двух вариантах подробно, через два-три дня, измерялась объемная влажность (нейтроннометрически), давление влаги (тензиометрами), а также осадки, лизиметрический сток, испарение с поверхности почвы. Более подробное описание почвенных условий сделано раньше.

Физически обоснованная модель помогает рассчитать режимы влажности и сток воды с нижней границы для указанных двух вариантов почв, при экспериментально определенных условиях на верхней и нижней границах. Можно сравнить расчетные режимы с реальными для того, чтобы оценить, насколько современная модель адекватно и подробно описывает эти процессы. Была исполь-

зована модель “AQUASALT” (автор – А.К. Губер). В качестве статистик, характеризующих совпадение расчетных и реальных данных, использовали следующие: 1)  $S_r$  – среднее значение неадекватности модели или стандартное отклонение погрешностей модели (погрешность модели – разность между реальным значением и расчетным), 2) отношение квадрата неадекватности к квадрату чистой ошибки ( $S_e^2$ ); последняя есть аналог дисперсии для экспериментальных данных, 3) нормализованная объектная функция, NOF, являющаяся отношением среднего значения неадекватности к среднему арифметическому, – аналог коэффициента вариации и 4) критерий адекватности, определяемый как значимость регрессионного уравнения связи погрешностей модели с расчетной величиной по критерию Фишера (F-критерий). Первые три статистики указывают на величины и разброс погрешностей моделирования, а четвертая – на наличие систематических ошибок моделирования. Вполне понятно, что чем больше первые три статистики, тем менее удачно модель описывает природный процесс; чем выше уровень значимости (меньше значения  $\alpha$ , уровня значимости) уравнения по F-критерию (4-я статистика), тем значительнее систематические ошибки. Именно поэтому последний критерий мы назвали “уровень значимости систематических ошибок модели”.

Все указанные статистики приведены в табл. 6. Из этой таблицы видно, что все использованные статистики указывают, что вариант “глубокий плантаж” неудовлетворительно описывался как в отношении режима влажности, так и лизиметрического стока. На это указывают и высокие значения неадекватности модели, и отношения квадрата неадекватности к квадрату чистой ошибки, и высокая достоверность наличия систематических ошибок. Напомним, что мы использовали одну и ту же модель, одни и те же граничные условия и экспериментально определенные для каждой почвы начальные условия. По всей видимости, в случае варианта “глубокий плантаж” модель либо не учитывает некие физические процессы, либо описывает их недостаточно корректно. По нашему мнению, различие в модельном описании заключается в том, что основные процессы переноса воды в варианте “глубокого плантажа” – это перенос по макропорам, инфлюкционный характер передвижения воды. Модель не описывает указанные физические процессы. Вследствие этого она неадекватно описывает внутрипочвенные процессы.

Какой же можно сделать вывод из такого сравнения. Очевидно, следующий. Лимитирующий фактор дальнейшего развития прогнозных моделей, предназначенных для расчета экологического риска, – физическое обоснование и описание специфических почвенных процессов переноса. Необходимо знать перенос веществ по специфическим почвенным образованиям (трещины, макропоры и т.д.) с учетом их происхождения, природы и особенностей физического проявления в виде трещин усадки/набухания, стабильной макропористости, биопор и пр., перенос веществ с учетом особых свойств почвенного органического вещества, почвенной структуры и ряд других, специфических почвенных процессов. Только в этом случае мы будем иметь адекватные математические модели, способные оказывать квалифицированную помощь специалистам в предсказании, управлении, снижении последствий катастроф, расчете экологического риска.

В этом разделе, по-видимому, было бы целесообразным остановиться еще на одной, возможно, второстепенной функции почв – эстетической. А именно создание различных почвенных конструкций специального, чаще всего эстетического назначения – декоративные и спортивные газоны, декоративный ландшафт.

Таблица 6

**Статистические параметры адекватности описания прогностической математической моделью режима влажности и лизиметрического стока из дерново-подзолистой почвы (большие лизиметры Почвенного стационара факультета почвоведения МГУ)**

Статистический параметр	Влажность	Лизиметрический сток	Статистический параметр	Влажность	Лизиметрический сток
Вариант	"ГЛУБОКИЙ ПЛАНТАЖ"		Вариант	"МЕЛИОРАТИВНАЯ ВСПАШКА"	
$S_r^2$	0,0395	4,8688	$S_r^2$	0,0203	2,1699
NOF	0,1075	1,5576	NOF	0,0582	0,7153
$S_r^2/S_e^2$	6,9426	1,4259	$S_r^2/S_e^2$	0,7059	0,2505
Уровень значимости систематических ошибок (по F-критерию)	0,0123	0,0321	Уровень значимости систематических ошибок (по F-критерию)	0,314	0,0675

шафтный дизайн и т.д. В этом случае требуется создание специальных искусственных почвенных конструкций со строго заданными свойствами. Например, спортивный газон должен быстро дренировать влагу, удерживать ее в количестве, необходимом для роста травы, выдерживать механические нагрузки. Если же это подогреваемый газон, и в какой-нибудь сложной климатической области (например, в зоне вечной мерзлоты), то количество требований возрастает во много раз. И единственным научно-обоснованным подходом может быть предварительный расчет этой почвенной конструкции с помощью указанных прогнозных моделей. Как инженер-конструктор рассчитывает по специальным уравнениям инженерную конструкцию, точно так же современный почвовед должен рассчитать на прогнозной модели оптимальный вариант почвенной конструкции с точки зрения заранее заданных ее функций. В основе такого расчета будут лежать опять-таки поливариантные расчеты с подбором послойных гидрофизических функций до тех пор, пока расчетная конструкция не будет удовлетворять требуемым свойствам. И на последнем этапе можно с помощью так называемых педотрансфункций рассчитать и состав почвенных смесей (гранулометрия, плотность, количество органического вещества и др.) для создания многослойной почвенной конструкции. И в этом случае для осуществления почвенной функции (эстетической) требуется прежде всего анализ почвенных потоков вещества и энергии как внутри-, так и на границах почвы, который может быть осуществлен только на основе физически обоснованной математической модели.

Теперь мы имеем возможность остановиться еще на одной важной почвенной функции – функции *сохранения и поддержания биоразнообразия*. Под этой функцией почвы мы понимаем прежде всего способность почвенного покрова предоставлять возможность для обитания разнообразным группам организмов, тем или иным образом связанным с почвой. То, что почва – весьма разнообразное природное тело в горизонтальном его протяжении, мы начинаем понимать все больше и больше. И все в большей мере оценивать это почвенное разнообразие, прежде всего как взаимосвязанное с общеземным биоразнообразием. В этой части главы остановимся на свидетельствах этого разнообразия, доказательствах его стабильности, устойчивости.

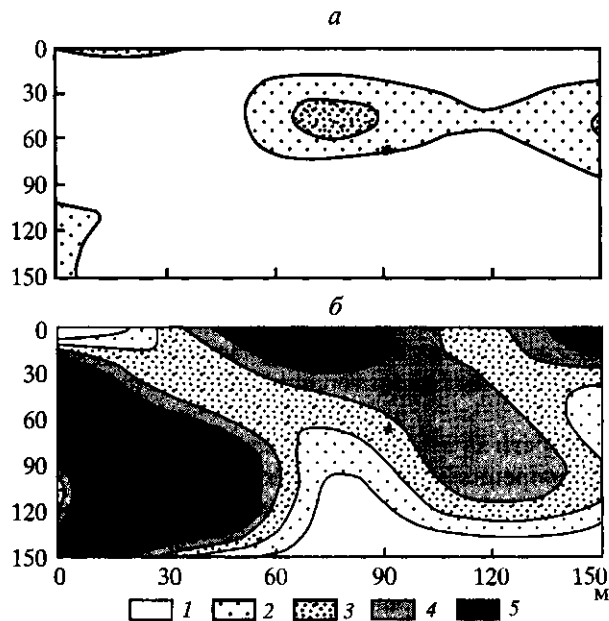


Рис. 15. Распределение по площади опытного поля участка:

*a* – вероятность появления периодов недостаточного увлажнения ( $W < 0,7 \text{ НВ}$ ) в слое 80 см; *b* – вероятность появления переувлажнения ( $W > \text{НВ}$ ) 1–5 вероятности: 1 –  $< 0,1$ ; 2 –  $0,1-0,15$ ; 3 –  $0,15-0,2$ ; 4 –  $0,2-0,25$ ; 5 –  $> 0,25$

Прежде всего, связанные с почвой организмы, будь то растения или животные, требуют для своего развития определенного благоприятного диапазона водно-воздушных условий. Об этом говорилось выше. Однако разные организмы требуют и различных условий. Способна ли почва предоставить такие разнообразные водно-воздушные условия на своем протяжении? Насколько велико и стабильно это разнообразие? Остановимся на примере одного исследования, проведенного на типичных черноземах в Воронежской области.

На участке (2,25 га) сельскохозяйственного поля, находящегося под черным паром, в течение части вегетационного сезона (более месяца) было проведено детальное исследование водного режима в 20-ти равномерно, по прямоугольной сетке, расположенных точках опробования. В этих точках до глубины 100 см были установлены обсадные трубы для нейтронной влагометрии. Ежедневно (более месяца) определяли влажность и ряд метеопараметров в каждой из точек. Причем тарировочные кривые для влагометрии в каждой точке были получены отдельно, благодаря дополнительному семикратному определению влажности термостатно-весовым методом.

При оценке водного режима исследуемых черноземов в величинах влажности почвы мы применяли метод вероятностной оценки периодов недостатка влаги и переувлажнения. Выше этот метод описан и применен для оценки почвенных водно-воздушных условий оптимальности в отношении величин давления влаги. Здесь используется этот подход для оценки вероятности периодов недостатка влаги (ВН) и переувлажнения (ВП) как основных количественных характеристик водного режима. ВН – это вероятность появления в экспериментальном массиве данных по влажности почвы величин влажности менее  $0,7 \text{ НВ}$ , а ВП – вероятность появления влажностей выше  $\text{НВ}$ . Для каждой точки мы



Таблица 7

**Пример изменения величин канонической корреляции между профилями влажности в разные моменты времени (базовая временная точка 600 час)**

Время, час	480	504	528	576	600	624	648	672	676
Козф.корреляции	0,950	0,958	0,960	0,970	1,00	0,986	0,986	0,980	0,967

имели возможность рассчитать ВН и ВП на основе более чем 30 дат по влажности в единицах запасов влаги в слое 0–80 см. На рис. 15 приведены топоизоплеты указанных вероятностных характеристик водного режима почв на исследуемой территории.

Из рис. 15 видно, что за время исследований опытному участку были свойственны зоны с повышенной вероятностью засухи (рис. 15 а), и в то же время и на том же участке – зоны с высокой вероятностью переувлажнения (рис. 15 б). Это значит, что даже на сравнительно небольшом выровненном участке в черноземной зоне можно найти части, в которых преимущественно наблюдаются засушливые периоды. Засушливые в отношении выбранного нами некоторого “усредненного” растения, когда влажность ниже 0,7 НВ. Но благоприятные (может быть и единственно возможные) для обитания ксерофитных растений и других организмов. Точно так же, и в отношении местообитаний с повышенной влажностью, больше НВ. Это части участка с переувлажнением, “удобные” местообитания для флоры и фауны, предпочитающей анаэробные условия. Таким образом, почва способна предоставить условия для всего этого биологического разнообразия. Условия, прежде всего водно-воздушные, по-видимому, также многообразны и в отношении тепла. Человек пытается устранить это многообразие, считая его “пестропольем”, виной пестроты урожая на поле. Однако почва в пределах своего профиля способна поддерживать многообразие водно-воздушных и тепловых условий. И, видимо, весьма устойчиво.

Для проверки последнего утверждения об устойчивости пространственной структуры водно-воздушного режима воспользуемся подходом к оценке устойчивости, примененного рядом исследователей, Самсоновой с соавт. (в печати), которые использовали термин временной стабильности, как устойчивости во времени корреляции между местоположением и параметрами частотных распределений гидрологических и физических почвенных свойств. В нашем случае в качестве переменных выступают значения влажности на пяти глубинах. За базовый временной отсчет мы взяли точку 600 ч (коэффициент корреляции равен 1), относительно которой и рассчитывали коэффициенты корреляции как до, так и после этого времени. Как показывают расчеты, степень связи между профилями влажности в отдельные моменты времени оказывается очень сильной – коэффициенты корреляции для первых канонических переменных превышают величину 0,95 даже для моментов времени, которые разделяет 30 дней (табл. 7). Как и следовало ожидать, с увеличением интервала между измерениями величины коэффициентов канонической корреляции уменьшаются (табл. 7), однако их значения меняются очень слабо, что свидетельствует о сохранении жесткой связи между переменными. И это несмотря на то, что в этот период наблюдались интенсивные и неравномерные по площади осадки; испарение с поверхности почвы тоже было весьма изменчивым. Иначе говоря, почва способна под-

держивать свой водно-воздушный (вероятно, и другие) режим в пространстве весьма устойчиво, предоставляя тем самым “надежную, устойчивую” основу для разнообразных организмов.

Конечно, напрашивается вопрос, за счет чего же проявляется разнообразие таких весьма динамичных параметров как содержание воздуха и влаги при наличии их стабильности. К сожалению, на этот вопрос в общем плане ответить пока невозможно. А в каждом конкретном случае причины такой пространственной неоднородности и ее устойчивости могут быть различны. В случае с типичными черноземами, это, по-видимому, исходная неоднородность материнских пород. В других случаях – иные причины. Однако эти два качества почвы – пространственное разнообразие почвенно-физических условий и ее устойчивость – это основа для такой функции почвы как сохранение биоразнообразия.

### Заключение

Анализ основных почвенных функций в биосфере приводит к мнению, что основой этих функций являются потоки веществ и энергии как внутри почвы, так и на ее границах. Именно благодаря этим вещественно-энергетическим потокам, почва общается с другими компонентами биосферы, осуществляя указанные функции. Основой формирования, динамики этих потоков являются физические почвенные свойства и процессы. Именно это позволяет создать сначала физическую теорию (модель) почвенных функций в биосфере, которая и должна явиться фундаментом для комплексной модели почвенных функций в биосфере.

Следует, конечно, отметить, что проведенный анализ весьма односторонен и не в полной мере охватывает все внутренние и внешние взаимосвязи почвенной системы. Действительно, мы отнесли такое почвенное свойство как сопротивление пенетрации (твердость) к свойствам, ответственным за осуществление почвофункции. Однако не следует недооценивать и того, что увеличение сопротивления пенетрации или плотности почвы приведет не только к резкому снижению роста корней, но и к последовательному изменению функций растений, в частности, фотосинтеза. Известно, что увеличение плотности от 1,2 до 1,6 г/см<sup>3</sup> приводит не только к уменьшению потребления <sup>14</sup>C из атмосферы от 2311 до 1207 мг/сосуд, но и к увеличению выделения CO<sub>2</sub> от 18 до 29%. Все это, в конечном итоге, скажется на увеличении потерь в виде углекислого газа, – а это уже область глобальных экологических функций почв, – выделение газов, ответственных за “парниковый эффект”. Этот пример доказывает, что сделанное подразделение почвенных физических свойств по трем почвенным функциям весьма условно. И каково значение того или иного физического свойства и процесса в осуществлении конкретной почвофункции, сказать строго количественно сейчас невозможно. Это на данный момент одно из перспективных направлений исследований, выясняющих не только обеспеченность почвой ее функций, но и возможность управления этими функциями.

### Глава 3

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ПОЧВ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СПЕЦИФИКОЙ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, СВОЙСТВ И ПРОЦЕССОВ КАК БИОКОСНЫХ ТЕЛ

### Введение

Рост растений определяется их взаимодействием с почвой – обычной средой для роста корней. Корни растений поглощают из почвы питательные элементы, воду и служат якорем, удерживающим надземную часть растения. Способность растений расти с максимальной скоростью зависит от того, обладает ли почва биологическими, химическими и физическими свойствами, необходимыми для того, чтобы корневая система полностью обеспечивала потребность растения в питательных элементах и воде для осуществления биохимических реакций, происходящих в корне. Скорость поглощения питательных элементов растением определяется процессами, происходящими в корнях растения и почве.

Накопление элементов может варьировать очень сильно в зависимости от вида растений, возраста и концентрации других элементов. Уже в начале этого века было ясно, что ни присутствие, ни концентрация минеральных элементов в самом растении не являются еще критерием их необходимости. Хорошо зарекомендовало себя в этом отношении тройное правило, выведенное в 1939 г. [Arnon, цит. по: Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. London e.a.: Academic Press, 1986. – 674 p.]. Элемент признается необходимым в том случае, если: 1) растение без него не может закончить жизненный цикл; 2) другой элемент не может заменить функцию исследуемого элемента; 3) элемент непосредственно включен в метаболизм растения (табл. 8).

В дальнейшем, главное внимание будет уделено именно этим, необходимым для питания растений, элементам.

### Химия ассоциации почва – питательные элементы

Доступность находящихся в почве питательных элементов в значительной степени определяется количеством и природой этих элементов в почвенном растворе и их взаимодействием с питательными элементами, содержащимися в твердой фазе почвы или адсорбированными на ней. Взаимодействие питательных элементов с поверхностью почвенных частиц зависит от химической и фи-

Таблица 8

Необходимые минеральные элементы питания высших и низших растений

Классификация	Элемент	Высшее растение	Низшее растение
Макроэлементы	N, P, S, K, Mg, Ca	+	+ (исключение: Ca <sup>2+</sup> для грибов)
Микроэлементы	Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl	+	+ (исключение B для грибов)
"Благотворные" элементы	Na, Si, Co, I, V	±	±

зической природы поверхности, которая в свою очередь зависит от того, какой минеральный или органический материал входит в состав почвенных частиц. Почвенный материал можно разделить на следующие категории: кристаллический неорганический, аморфный неорганический и органический. Кристаллические минералы можно идентифицировать по структурному расположению атомов, а аморфные – по их химическому составу и морфологии. Органические соединения могут быть охарактеризованы по их химическому составу и наличию различных функциональных групп, например, карбоксильных, гидроксильных и метильных.

Переход элементов питания из твердой фазы почвы в почвенный раствор может быть результатом таких процессов как обмен, разложение, растворение и десорбция. Скорость высвобождения, так же как и количество элементов, которое может вовлекаться в этот процесс, играет существенную роль в обеспечении потока питательных элементов через почву к корням растений.

Для того чтобы оценить роль физико-химических свойств почвы в снабжении растений питательными элементами, кратко рассмотрим процессы, определяющие поступление элементов в корни растений.

1. **П е р е х в а т.** Барбер [1988] использует термин “перехват” корнями для описания тех почвенных питательных элементов, которые находятся на поверхности корня и, следовательно, не должны передвигаться к границе раздела корень/почва, чтобы оказаться доступными для поглощения. В это понятие входят и ионы, вступающие в контакт с корнем в процессе его роста. Количество питательных элементов, поступающее в растение за счет перехвата корнями, принимают равным их количеству в объеме почвы, соответствующем объему корня. Расчеты показывают, что за счет перехвата корнями в растение поступает менее 1% доступных питательных элементов, находящихся в почве. Доступные питательные элементы включают в себя ту форму или те формы, которые могут быть немедленно поглощены корнями растений. К доступным относят растворимые формы питательных элементов и те их формы, ассоциированные с твердой фазой (за исключением высвобождающихся в процессе разложения органического вещества), которые быстро (в течение одного-двух дней) уравниваются с питательными элементами в почвенном растворе.

2. **М а с с о в ы й п о т о к.** Массовый поток – это передвижение питательных элементов через почву к корням в конвективном потоке воды, вызванном поглощением воды растением.

Количество питательных элементов, передвигающееся в массовом потоке, зависит от поглощения воды и концентрации в ней этих элементов (табл. 9).

В табл. 9 представлены комплексы, доминирующие в хорошо аэрированных почвенных растворах. Свободные ионы и комплексы в строках таблицы размещены в порядке снижения их доли от общего содержания элемента в растворе. В почвенном растворе может содержаться от 100 до 200 различных растворимых комплексов. При низких значениях рН среды в растворах доминируют свободные ионы и протонированные анионы, при высоких значениях рН – карбонатные и гидроксидные комплексы.

3. **Д и ф ф у з и я.** Когда перехват корнями и массовый поток не обеспечивают снабжение корней достаточным количеством отдельных питательных элементов, продолжающееся поглощение снижает концентрацию доступных питательных элементов в почве у поверхности корня. Это приводит к возникновению концентрационного градиента, направленного перпендикулярно по отношению к поверхности корня, что вызывает последующую диффузию питательных элементов по градиенту к поверхности корня.

Таблица 9

**Концентрация основных питательных элементов в почвенном растворе  
[Барбер, 1988]**

Элемент питания	Концентрация в растворе (мкмоль/л)	Элемент питания	Концентрация в растворе (мкмоль/л)	Элемент питания	Концентрация в растворе (мкмоль/л)
$\text{NO}_3^-$	100–20 000	$\text{K}^+$	100–1000	$\text{Mg}^{2+}$	100–5000
$\text{NH}_4^+$	100–2000	$\text{Ca}^{2+}$	100–5000	$\text{SO}_4^{2-}$	100–10 000
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ и $\text{HPO}_4^{2-}$	1–20				

Таблица 10

**Относительное значение перехвата корнями, массового потока и диффузии в обеспечении потребностей кукурузы в питательных элементах на плодородном пылеватом суглинке альфисол, кг/га [Барбер, 1988]**

Питательный элемент	Необходимо для урожая зерна 9500 кг/га	Приблизительное количество, поступившее путем		
		перехвата корнями	массового потока	диффузии
Азот	190	2	150	38
Фосфор	40	1	2	37
Калий	195	4	35	156
Кальций	40	60	150	0
Магний	45	15	100	0
Сера	22	1	65	0

При наличии концентрационного градиента движение идет интенсивнее из зоны большей концентрации в зону меньшей концентрации и продолжается до тех пор, пока концентрации не выровняются. Вследствие того, что корни поглощают питательные элементы, равновесие не достигается и они продолжают диффундировать к корню по концентрационному градиенту. В макромасштабе диффузия ионов в почве зависит от доли почвенного объема, занятого водой, извилистости диффузионного пути и химического и физического воздействия твердой фазы на движение ионов. Когда мы имеем дело с неадсорбируемыми ионами, например нитратами, объемное содержание влаги и извилистость пути являются главными факторами, снижающими скорость диффузии. Некоторые добавочные ограничения при диффузии ионов могут происходить вследствие влияния почвы на вязкость воды и притяжение заряженных ионов к поверхности почвы. Для таких адсорбируемых ионов, как обменные катионы и адсорбируемые фосфаты, скорость диффузии уменьшается вследствие осуществляемого в процессе диффузии уравнивания между ионами в адсорбирующей фазе и фазе почвенного раствора. Данные, представленные в табл. 10, показывают относительную роль различных механизмов обеспечения питательными элементами при выращивании кукурузы на альфисоле.

Перехват корнями вносит небольшой вклад в общую обеспеченность всеми питательными элементами, за исключением кальция, содержание которого в

почве значительно превышает потребности растений кукурузы. Массовый поток может обеспечить потребности культуры во всех питательных элементах, кроме азота, фосфора и калия.

Таким образом, ведущими физико-химическими факторами, определяющими поступление элементов в растения, должны являться реакции, протекающие на границах раздела твердых и жидких фаз почвы, контролирующие уровни содержания главных элементов питания в почвенном растворе

### Адсорбция катионов

Отрицательно заряженные почвенные частицы обычно удерживают катионы с такой силой, что они легко могут быть обменены на катионы почвенного раствора. Общее число обменных участков можно определить, суммируя количество всех обменных катионов или насыщая обменные участки одним катионом, например аммонием, а затем вытесняя его и определяя количество, которое соответствует катионообменной емкости. Ее величина изменяется в зависимости от рН замещающего раствора из-за присутствия рН-зависимых обменных участков. В почве катионы, нейтрализующие отрицательный заряд обменных участков, находятся в равновесии с катионами раствора. Равновесие между двумя фазами обычно наступает очень быстро (в течение минут). Сила связывания катиона на обменном участке зависит от природы отрицательного заряда, а также валентности, степени гидратации и размера катиона. Когда присутствует несколько катионов, относительная сила их связывания определяет их равновесные концентрации в растворе.

Источником катионообменных участков могут быть:

1. Постоянный заряд, образованный:

а) отрицательным зарядом, обусловленным изоморфными замещениями в сетках тетраэдров глинистых минералов;

б) отрицательным зарядом, обусловленным изоморфными замещениями в сетках октаэдров глинистых минералов.

2. рН-зависимый заряд, образующийся:

а) при разрыве связей на краях кристаллов;

б) при диссоциации  $H^+$  с поверхности аморфных минералов и гидроксидов;

в) из карбоксильных групп органического вещества;

г) из гидроксильных групп органического вещества.

Постоянный отрицательный заряд возникает при изоморфном замещении преобладающих катионов Si или Al, присутствующих в центре тетраэдров или октаэдров, катионами с более низкой валентностью. Отрицательный заряд, не скомпенсированный в структуре минерала замещающим катионом, уравновешивается обменными катионами, удерживаемыми на поверхности глины. Сила связи зависит от расстояния между отрицательным зарядом и ближайшим катионом. Заряды, образующиеся в сетках октаэдров, находятся дальше от уравновешивающего катиона, чем заряды, образующиеся в сетках тетраэдров. Сила, действующая между зарядами, определяется по закону Кулона:

$$F = q_1 q_2 / (r^2 D),$$

где  $F$  – сила притяжения;  $q_1$  и  $q_2$  – электрические заряды;  $r$  – расстояние, разделяющее заряды;  $D$  – электрическая постоянная (78 для воды при 25 °С).

Поэтому сила связи прямо пропорциональна величинам зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Зависимый от рН заряд аморфных минералов и водных гидроксидов образуется при диссоциации  $H^+$ . Если частицы оксидов поместить в воду, то она адсорбируется на их поверхности и диссоциирует на  $H^+$  и  $OH^-$ . При преимущественной диссоциации  $OH^-$  частицы заряжаются положительно, при преимущественной диссоциации  $H^+$  – отрицательно. Значение рН раствора, окружающего частицу, влияет на соотношение диссоциации  $OH^-$  и  $H^+$ . При определенном значении рН наблюдается одинаковая диссоциация двух ионов, и в данном случае частица не заряжена (рН нулевой точки заряда). При возрастании рН  $H^+$ -ионы диссоциируют с поверхности и число катионообменных мест увеличивается.

Обменные катионы на поверхности почвы имеют тенденцию в соответствии со своей кинетической энергией диффундировать в раствор до тех пор, пока противоположно направленный потенциал не ограничит дальнейшее движение с поверхности почвы. Это распределение называется двойным диффузионным слоем вследствие того, что слой отрицательных зарядов глинистого минерала уравновешен диффузионным слоем положительно заряженных катионов. Концентрационное распределение катионов перпендикулярно поверхности и может быть описано уравнением Больцмана:

$$C_1/C_2 = \exp[-\Delta E_p/(k_B T)],$$

где  $\Delta E_p = (E_{p1} - E_{p2})$  – разность потенциальных энергий ионов на расстоянии 1 и 2 от поверхности частицы;  $k_B$  – постоянная Больцмана, определяющая кинетическую энергию иона;  $T$  – абсолютная температура;  $C_1$  и  $C_2$  – концентрации ионов на расстоянии 1 и 2.

Двойной слой простирается до точки, в которой  $C_1$  уже не превышает концентрацию в основном объеме раствора. Двойной слой сжимается при добавлении в основной раствор соли. Вследствие того, что двухвалентные катионы притягиваются сильнее, чем одновалентные, толщина двойного слоя для двухвалентных катионов также меньше.

Толщина двойного слоя в почвах, насыщенных натрием при низкой концентрации солей ( $10^{-5}$  моль/л), достигает 50 нм, а при насыщении почв двухвалентными катионами и высокой концентрации соли (0,1 моль/л) сжимается до 0,5–1,0 нм. Двойной диффузионный слой может сказываться на обеспечении корней растений питательными элементами в связи с тем, что диффузионные слои почвы и поверхности корня могут накладываться один на другой, кроме того, двойной диффузионный слой может влиять на диффузию в почве.

### Адсорбция анионов

Такие анионы как фосфат, сульфат и борат обычно адсорбируются или осаждаются на поверхности почвы. Сложная природа почвенных поверхностей мешает определить истинный механизм этих процессов. Кроме того, реакции обычно протекают настолько медленно, что равновесные условия не достигаются.

У частиц с рН-зависимым зарядом общий заряд положителен, когда рН не превышает значения, определяющего нулевой заряд. Адсорбция анионов на таких частицах, обусловленная их положительным зарядом, считается неспецифической, и подобные ионы легко обмениваются. Однако такие анионы как фосфат, сульфат и фторид адсорбируются в количествах, значительно превышающих те, которые могут быть обусловлены неспецифической адсорбцией. На основании этих данных было сделано заключение о существовании специфической адсорбции.

Влияние физико-химических процессов, протекающих в почве на границах разделов фаз, на функционирование экосистемы в целом особенно ярко может быть проиллюстрировано на примерах реакций этого биокосного тела на различные виды антропогенных воздействий.

Пример 1. Воздействие кислотных осадков на почвы и экологические последствия изменения почвенных свойств (по Т. Копчик).

Среди актуальных проблем загрязнения окружающей среды одно из важных мест занимает антропогенная эмиссия в атмосферу оксидов серы и азота. Значительно усилившееся в последние десятилетия воздействие промышленной деятельности человека на формирование природных циклов серы и азота привело к обострению проблем, связанных с выпадением на поверхность суши и водоемов кислотных атмосферных осадков.

Ежегодно техногенными источниками выбрасывается более  $100 \times 10^6$  т сернистого ангидрида, на долю которого приходится более 95% эмиссии газообразных соединений серы. Подобный поток в семь раз превышает поступление элемента в результате природных процессов. По некоторым прогнозам к 2000 г. ожидается расширение антропогенного потока  $\text{SO}_2$  до  $200\text{--}300 \times 10^6$  т в год. Поступление в атмосферу оксидов азота, образующихся при сжигании топлива и в ряде индустриальных процессов, оценивается величиной около  $50 \times 10^6$  т в год, что в 10–20 раз меньше эмиссии связанного азота в результате микробиологической денитрификации в почвах и водах. В то же время тенденция к прогрессирующему расширению потока оксидов азота из антропогенных источников выражена более отчетливо, чем для  $\text{SO}_2$ .

Поступившие в атмосферу оксиды серы и азота, а также кислые продукты их превращения в реакциях окисления и гидратации сохраняются в атмосфере в течение нескольких суток. За это время они могут быть перенесены с воздушными потоками на сотни, а иногда и на тысячи км от источников выбросов, и проблема загрязнения атмосферы приобретает региональный характер.

Атмосферные осадки являются эффективным средством очищения подоблачного тропосферного слоя от примесей загрязняющих веществ (с осадками из атмосферы может выводиться более 80% кислотообразующих поллютантов). Значение pH атмосферных осадков определяется балансом основных и кислотных компонентов, поэтому связь реакции среды осадков с содержанием в них ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{NO}_3^-$  неоднозначна. Возможна как прямая корреляция между кислотностью и концентрациями кислотообразующих анионов, так и отсутствие подобной связи из-за нейтрализации осадков примесями щелочных компонентов. В соответствии с равновесием, устанавливающимся между водой и растворенным в ней  $\text{CO}_2$  в стандартных условиях, принято считать, что pH незагрязненных осадков составляет примерно 5,6.

В настоящее время в мире существуют два крупных региона с хроническими кислыми атмосферными осадками. Первый – на Северо-Востоке США, где средневзвешенный pH атмосферных выпадений равен 4,1–4,2, второй – в Центральной и Северной Европе – pH осадков 4,1–4,4. Наиболее низкие значения pH атмосферных осадков отмечаются вблизи крупных металлургических комбинатов – pH дождевых и снеговых вод может опускаться ниже 3,0.

Основную нагрузку кислотных выпадений принимают на себя наземные экосистемы. От 20 до 50% лесов в странах Центральной Европы повреждено вследствие воздействия кислотных поллютантов атмосферы. Продуктивность лесов на севере Европы падает в среднем на 1% в год и, по оценке экспертов ЭЭС, выпадение кислотных осадков вызывает ежегодное снижение производст-



Буферные зоны почвы [Ulrich, 1980]

Буферная зона	Диапазон значений	Процесс, обеспечивающий проявление буферности	Буферная емкость
Карбонатная	6,2 < pH < 8,6	Переход карбонатов в бикарбонаты с высвобождением в почвенный раствор Са	150 кмоль Н <sup>+</sup> /га дм на 1% карбонатов
Силикатная	5,0 < pH < 6,2	Выветривание силикатов с высвобождением в почвенный раствор катионов II–III групп	6 кмоль Н <sup>+</sup> /га дм на 1% глинистых минералов
Катионообменная	4,2 < pH < 5,0	Внедрение кислых катионов в ППК с вытеснением в почвенный раствор обменных оснований	0,10–0,15 кмоль Н <sup>+</sup> /га дм на 1% коллоидных частиц
Алюминиевая	3,0 < pH < 4,2	Растворение алюмосодержащих минералов с высвобождением в почвенный раствор мономерного Al <sup>+</sup>	100–150 кмоль Н <sup>+</sup> /га дм на 1% коллоидных частиц
Железная	2,5 < pH < 3,0	Растворение полуторных окислов с образованием ионов Fe <sup>+</sup>	

ва валового национального продукта на 3–8%. В результате ущерб сельскохозяйственному производству в некоторых странах Центральной Европы оценивается в 500 млн долларов в год, а в России только на Северо-Западе в 1980-е гг. ежегодно тратилось дополнительно по 100 млн руб., из которых 40 млн руб. идет на вынужденное известкование почв.

Почва как компонент биогеоценоза во многом определяет устойчивость ландшафта к закислению.

Почва обладает известной устойчивостью к внешним воздействиям и способностью противостоять кислотному антропогенному прессингу, по крайней мере в пределах определенного интервала значений pH осадков.

На основе показателя pH водной суспензии почвы условно выделяют пять буферных систем или зон, в пределах которых происходит потребление протонов (табл. 11). Компоненты буферных систем (за исключением карбонатов) присутствуют в той или иной степени в каждой почве, однако в различных интервалах значений pH одна из зон получает ведущую роль (табл. 12).

Средняя скорость внутрипочвенного потребления протонов для разных почв в пределах 0,2–2,0 кмоль Н<sup>+</sup>/га в год. Поэтому считается, что опасность антропогенного закисления не грозит большинству типов почв, если с кислотными дождями поступает не более 0,1–0,2 кмоль Н<sup>+</sup>/га в год. Балансовые расчеты, проведенные для малого водосбора лесной территории, который получает из атмосферы 0,2 кмоль Н<sup>+</sup>/га в год, показывает, что в почве участка задерживается до 97% протонов [Stottlemyer, Hanson, 1989]. Однако в настоящее время с кислотными осадками на поверхность почвенно-растительного покрова ряда стран Северной Америки и Европы поступает в год до 1,0 кмоль Н<sup>+</sup>/га в год, что, безусловно, может нарушить баланс внутрипочвенного продуцирования и потребления протонов и сместить сложившееся равновесие в сторону закисления почвы. В фоновых лесных экосистемах Прибалтики отмечено выпадение из атмосферы до 0,3 кмоль Н<sup>+</sup>/га, а максимальная кислот-

Таблица 12

**Основные компоненты почвы, определяющие буферность почв к кислотам**  
[Schwertmann et al., 1987]

Компоненты почвы, определяющие буферность к кислотам	Основная реакция	Диапазон значений рН	Изменение химических свойств почв
1	2	3	4
<b>Карбонаты щелочномельных катионов</b>			Выщелачивание $\text{CaCO}_3$ из почвы в форме $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
карбонаты	$\text{CaCO}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$	8–6,5	
гидрокарбонаты	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	7–4,5	
<b>Носители зависящего от рН заряда</b>			Потеря обменных катионов, протонирование зависящего от рН заряда
глинистые	$[\text{ГМ}-\text{OH}]\text{M} + \text{H}^+ \rightarrow \text{ГМОН}_2 + \text{M}^+$	8–5	
	$\text{ГМ}-\text{OH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{ГМОН}_2^+$	6–3	
минералы	$\text{R}-(\text{COO})\text{M} + \text{H}^+ \rightarrow \text{R}-\text{COOH} + \text{M}^+$	6–3	
гуминовые вещества	$\text{R}-\text{NH}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{R}-\text{NH}_3^+$	6–4	
<b>Силикаты</b>			Освобождение решеточных катионов, разрушение глинистых минералов, снижение ЕКО, потеря обменных катионов
первичные силикаты	$-(\text{SiO})\text{M} + \text{H}^+ \rightarrow \text{Si}(\text{OH}) + \text{M}^+$	<7	
глинистые минералы без постоянного заряда	$-(\text{SiO})_3\text{Al} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Si}(\text{OH})_3 + \text{Al}^{3+}$		
глинистые минералы с постоянным зарядом в октаэдрах	$\text{Mg}(\text{O}, \text{OH})\text{M} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{M}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	<4,5	
в тетраэдрах	$\text{AlO}_2] + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{M}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$		
<b>Оксиды-гидроксиды</b>			Появление Al в растворе и в обменной форме, повышение ЕКО, освобождение $\text{SO}_4^{2-}$
гидроксиды Al (включая межпакетные прослойки)	$\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	4,8–3	
Al-гидросульфат	$\text{AlOH}\text{SO}_4 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$	4,5–3	
<b>Оксиды и гидроксиды Fe</b>			Появление Fe и Mn в растворе и в обменной форме
без восстановления	$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	<3	
	$4\text{FeOOH} + \text{CH}_2\text{O} + 8\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{2+} + \text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$	<7	
с восстановлением			
<b>Оксиды и гидроксиды Mn</b>			
с восстановлением	$2\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{CH}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Mn}^{2+} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	<8	

**Систематизация почв по чувствительности  
к действию кислотных атмосферных выпадений  
[Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв, 1994]**

Степень чувствительности почвы		
Чувствительные	Слабочувствительные	Нечувствительные
Умеренно кислые ( $4 < \text{pH} \leq 6$ ) малобуферные	–	Нейтральные с $\text{pH} > 6$ и сильнокислые с $\text{pH} \leq 4$
С ЕКО $\leq 6,2$ м-экв/100 г в слое 0–25 см	С ЕКО 6,2–15,4 м-экв/100 г в слое 0–25 см	С ЕКО $>15,46$ м-экв/100 г в слое 0–25 см
Некарбонатные песчаные с $\text{pH} \approx 6$	Некарбонатные Глинистые с $\text{pH} \approx 6$ ; окультуренные с $\text{pH} \approx 5$ ; Кислые с $\text{pH} < 5$	Карбонатные
Умеренно кислые песчаные и опесчаненные с содержа- нием гумуса $<200$ т/га	Умеренно кислые легкосугли- нистые на лессах с содержа- нием гумуса $<200$ т/га  Умеренно кислые суглини- стые и глинистые с содержа- нием гумуса $>200$ т/га	Карбонатные

ная нагрузка на европейской территории бывшего СССР может превышать 0,6 кмоль  $\text{H}^+$ /га в год.

Изложенные представления Ульриха о зонах и механизмах буферности почв по отношению к кислотам были детализированы и дополнены Швертманном [Schwertmann et al., 1987], особенно в той части, которая касается реакций ионного обмена и адсорбции протонов. Как видно из табл. 13, Швертманн в качестве одного из механизмов буферности почв по отношению к кислотам рассматривает протонирование зависящих от  $\text{pH}$  обменных позиций, находящихся на глинистых минералах и органическом веществе.

Свойства почвы, подвергающейся воздействию кислотных осадков, значительно более существенный фактор, контролирующей особенности происходящих процессов, чем кислотность и состав самих осадков. Не только осадки с одинаковыми значениями  $\text{pH}$  вызывают различные ответные реакции почв в зависимости от степени их восприимчивости, но и критические (для каждой почвы) кислотные нагрузки из атмосферы способны привести к последствиям, отличающимся в разных почвах по интенсивности и характеру проявления [Г. Копчик и др., 2002].

Поскольку связывание компонентов осадков идет по преимуществу в реакциях ионного обмена, в большинстве классификаций в качестве основных параметров устойчивости почв используются  $\text{pH}$  почвы, сумма обменных оснований, степень насыщенности ППК, емкость катионного обмена. Эти параметры косвенно отражают и другие важные характеристики буферности почв – содержание гумуса и карбонатов, минералогический состав (табл. 13).

В приведенном варианте классификации почв по степени устойчивости к кислотным атмосферным выпадениям не учитываются процессы потребления протонов в реакциях внутрисочвенного выветривания и возможность измене-

Критические нагрузки для лесных почв в зависимости от их минералогического состава  
[Nilsson, Greenfelt, 1988]

Класс устойчивости почв	Минералы, контролирующие выветривание	Критическая нагрузка, $H^+$ кмоль/км <sup>2</sup> /год <sup>-1</sup>
Очень чувствительные	Кварц, К-полевые шпаты	<20
Чувствительные	Мусковит, плагиоклазы, биотит	20–50
Средней чувствительности	Биотит, амфиболы	50–100
Слабочувствительные	Пироксены, эпидот, оливины	100–200
Нечувствительные	Карбонаты	>200

ния баланса элементов в процессах их биологического круговорота и геохимической миграции. Попытки использовать количественные характеристики этих процессов предпринимаются при установлении критических кислотных нагрузок для разных по устойчивости почв и экосистем в целом. Под критической кислотной нагрузкой понимают максимальное количество осаждающихся кислотных компонентов, которое не вызывает химических изменений, приводящих к долговременным негативным воздействиям на структуру и функционирование экосистемы [Sverdrup et al., 1990].

Примером расчета критических нагрузок на почву может быть простой балансовый метод, исходящий из предположения о равновесном состоянии процессов ионного обмена. Гидрологические параметры и скорость выветривания почвенных минералов при этом принимаются постоянными и характеризуются среднегодовыми величинами:

$$CL(AC) = BC_W - BC_U - ANC_L - AC_N,$$

где  $CL(AC)$  – критическая нагрузка кислотности,  $BC_W$  – скорость высвобождения основных катионов (Ca, Mg, K, Na) при выветривании минералов,  $BC_U$  – поглощение основных катионов корнями растений,  $ANC_L$  – потери кислотно-нейтрализующей способности с поверхностным и внутрипочвенным стоком,  $AC_N$  – продуцирование протонов при трансформации азота в почве.

Скорость выветривания почвенных минералов (или скорость высвобождения катионов при выветривании), характеризуя единственный источник катионов в почве, является ключевым параметром при расчете критических нагрузок. Если скорость притока в почву протонов кислотных осадков становится сопоставимой со скоростью их потребления в реакциях выветривания минералов, естественные процессы не могут компенсировать снижение pH и выщелачивание катионов. Чем более устойчивы слагающие почву минералы, тем меньше способность пополнять запас обменных оснований в ППК и скуднее резерв буферности. Исходя из концепции внутрипочвенного баланса элементов, были установлены критические уровни поступления протонов из атмосферы для разных классов устойчивости почв. В основе оценки устойчивости при этом лежат минералы, преобладающие в разных почвообразующих породах (табл. 14). Сравнение критических уровней с реальными среднегодовыми поступлениями загрязняющих веществ из атмосферы показало, что в настоящее время многие почвы Скандинавии находятся под угрозой закисления.

В проблеме устойчивости почв к кислотным атмосферным выпадениям важное место занимает вопрос о том, как долго каждая конкретная почва спо-

**Возможные изменения физико-химических свойств почвы  
при воздействии кислотных осадков  
[Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв, 1994]**

Комплекс почвенных свойств	Характер изменений
Кислотно-основные свойства почвы	Снижение $pH_{\text{водн}}$ и $pH_{\text{сол}}$ Увеличение обменной и гидролитической кислотности Повышение доли $Al^{3+}$ в структуре обменных катионов ППК
Катионообменные свойства почвы	Выщелачивание Ca, Mg, K из ППК Снижение степени насыщенности ППК основаниями
Содержание и качество гумуса	Снижение скорости деструкции растительных остатков Торможение процессов минерализации гумуса Повышение подвижности фульвокислот и агрегация гуминовых кислот Уменьшение содержания водорастворимых органических соединений Изменение элементного состава гумусовых кислот
Формы соединений Fe и Al	Аккумуляция подвижных форм соединений металлов в верхних горизонтах профиля Увеличение доли аморфных соединений за счет трансформации несиликатных окристаллизованных и силикатных форм
Содержание и подвижность микроэлементов	Мобилизация в почвенный раствор Mn, Zn, Cd, Ni Уменьшение подвижности Mo и Cr Уменьшение подвижности Pb и Cu при умеренных кислотных нагрузках и мобилизация их при повышении кислотности

способна выдерживать ту или иную нагрузку атмосферных поллютантов без существенного изменения состава и свойств. Для этого используются попытки численного моделирования процесса закисления различных типов почв на основе прогнозирования изменений  $pH$ , степени насыщенности ППК и содержания обменного алюминия.

Изменения почвенных свойств, индуцируемые воздействием кислотных осадков (табл. 15), способны отразиться на жизненном состоянии и структуре растительной компоненты биогеоценоза.

Изменение кислотно-основного равновесия в почве влияет на мембранный потенциал корней, так как при снижении  $pH$  почвенного раствора подавляется диссоциация активных групп липидов, протеинов и других компонентов клеточной мембраны, понижается отрицательный заряд поверхности корней и, как следствие, поглощение катионов из раствора затрудняется. Нарушение процессов поглощения питательных веществ корневыми системами растений усугубляется изменениями в составе почвенного раствора. Доступность важных биофильных элементов – кальция, магния, калия – падает в результате их выщелачивания из ризосферы в более глубокие почвенные горизонты.

Одно из главных негативных последствий антропогенного закисления почвы – повышение мобильности алюминия, который обладает свойствами прямого и косвенного фитотоксиканта.

При мобилизации в почвенный раствор он подавляет процессы клеточного деления в корне, уменьшает интенсивность дыхания, нарушает поглощение и транспорт в растения питательных элементов, снижает доступность фосфора и молибдена из-за связывания их в труднорастворимые соединения. Наличие в почве подвижного алюминия ведет к снижению общей биомассы корней, еще в большей степени отражается на процессах их ветвления, что приводит к существенному уменьшению площади поглотительной поверхности корневой системы.

Под влиянием кислотных осадков повышают мобильность и некоторые другие элементы, обладающие фитотоксическими свойствами. К ним относятся Mn, Zn, Cd, Co, Ni, т.е. элементы, активно мигрирующие в кислых почвах в виде минеральных ионов. Почти все они – биохимические антагонисты железа: повышение их поглощения корневыми системами растений ведет к возникновению хлороза, обусловленного железистой недостаточностью. Mn и Zn – антагонисты Cu, выполняющей важные функции в метаболизме растений.

Изменения свойств закисляющихся почв способны оказать влияние и на структуру целой растительной ассоциации. Среди деревьев наиболее чувствительны к закислению почв хвойные, из низших растений – лишайники.

Компоненты кислотных осадков, а также мобилизованные в почве элементы, если они не поглощаются биотой и не связываются в нижележащих горизонтах почвы или слоях подстилающих пород, могут попасть с внутрипочвенным стоком в систему почвенно-грунтовых и поверхностных вод. Пресноводные экосистемы характеризуются значительно меньшей буферностью, чем почвы, поэтому изменения в химическом составе вод проявляются более ярко, чем в наземных экосистемах. В настоящее время почти пять тысяч озер в Швеции имеют рН воды ниже 5. Устойчивость поверхностных вод к подкисляющему воздействию атмосферных осадков зависит от особенностей водосборной поверхности и гидрологического цикла. Поскольку площадь самого озера относительно мала по сравнению с площадью, на которой идет сбор и накопление вод для грунтового питания водоема, чрезвычайно важное значение в определении устойчивости вод к подкислению имеет почвенный покров водосборного бассейна. Хорошо развитые мощные нейтральные почвы с высокой буферностью, большим содержанием гумуса и высокой степенью насыщенности ППК основаниями или карбонатные почвы способны полностью нейтрализовать действие кислотных осадков, и грунтовый сток не изменяет гидрохимического состава поверхностных вод. Кислые маломощные почвы с низким значением буферности, развитые на слабовыветрелых породах, не могут полностью нейтрализовать действие кислотных осадков и способствуют формированию кислого внутрипочвенного стока, обогащенного токсичными компонентами. Подобный сток может привести к закислению слабоминерализованных речных и озерных вод.

Чувствительными к воздействию кислотных осадков принято считать поверхностные воды со щелочностью менее 0,2 м-экв/л. Критическое значение рН речных и озерных вод – 5,0–5,5, однако некоторые биологические эффекты закисления могут проявляться и раньше. В закисленных водоемах отмечается подавление микробиологической активности, снижение популяций водорослей, фито- и зоопланктона, нарушение репродуктивных процессов у рыб и земноводных. В пресных водах с рН < 5 нарушается ионное и кислотно-щелочное равновесие в жабрах рыб. Отрицательное воздействие на гидробионтов могут оказывать и вымываемые из окружающих почв токсические элементы и соединения. В особенности это касается алюминия, который осаждается в форме гидрокси-

да на жабрах рыб, вызывая дисфункцию их работы. В результате снижается снабжение кислородом крови и нарушается в ней баланс солей [Acidification today..., 1982].

Таким образом, от устойчивости (или чувствительности) почвы к закислению во многом зависит судьба биогеоценоза и ландшафта в целом. Если почвы не обладают достаточной буферностью к воздействию кислотных атмосферных выпадений, то ухудшаются условия жизнеобитания растений, микроорганизмов и гидробионтов из-за изменения реакции среды, происходит усиление подвижности фитотоксичных элементов, снижение доступности элементов минерального питания. В то же время в устойчивых к действию кислотных осадков почвах могут отмечаться лишь незначительные изменения параметров состояния среды, не имеющие столь негативных последствий.

#### *Глава 4*

### **СТРОЕНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ПОЧВЕННЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ**

Экосистемы отличаются определенной прочностью, которая выражается в способности поддерживать гомеостаз. Почвенные микроорганизмы в естественных биогеоценозах поддерживают на постоянном, характерном для данного типа почвы уровне органическое вещество (гумус), различные индивидуальные органические вещества (ферменты, аминокислоты, органические кислоты, витамины, ауксины, токсины), содержание подвижного азота, фосфора, вероятно, скорость разрушения минералов и т.д. Хозяйственная деятельность человека довольно просто добилась значительной интенсификации процессов, проводимых почвенными микроорганизмами.

Опыт сельского хозяйства показывает, что микробиологические процессы разложения органических веществ, о которых можно, например, судить по интенсивности дыхания почвы, резко интенсифицируются, убыстряется круговорот биогенных элементов, что до определенных пределов может рассматриваться как положительное явление. Интенсификация процессов, осуществляемых почвенными микроорганизмами (разложение органического вещества, денитрификация, вероятно, и азотфиксация), при создании соответствующих условий достигается довольно легко. Однако такого рода интенсификация в связи с хозяйственной деятельностью человека часто оказывается вредной. Происходят чрезмерно быстрое разрушение органического вещества в осваиваемых торфяниках, превращение внесенных азотных удобрений в нитраты с последующим их вымыванием в грунтовые воды и реки, развитие процесса денитрификации, приводящее к газообразным потерям азота, и т.д.

Таким образом, общий тезис, применявшийся и часто теперь еще применяемый в почвенной микробиологии “чем больше, тем лучше” (в отношении количества микроорганизмов, ферментативной активности почв, скорости разложения клетчатки на зарытых в почву кусках ткани, накопления аминокислот, дыхания почвы и т.д.), кажется все более сомнительным. Если бы зоолог или ботаник начал отстаивать подобный тезис, то абсурдность его стала бы сразу очевидной. Например, чрезмерное развитие травоядных животных не ведет ни к чему хорошему для экосистемы. Чрезмерное развитие хищников также ведет

к повреждению экосистемы, а не к ее процветанию. Однако в области почвенной микробиологии положение “чем больше, тем лучше” отстаивается до сих пор. Если разобраться подробнее, то дело, как оказывается, здесь не только в ошибках почвенных микробиологов, но и в специфике функционирования комплекса почвенных микроорганизмов. Почвоведы-микробиологи, как правило, определяют не реальное воздействие экологического фактора на экосистему, а потенциальные возможности микроорганизмов в экосистеме и потенциальную биологическую активность почв (количество зачатков микроорганизмов, потенциальная ферментативная активность почв). Общий запас и большие потенциальные возможности часто говорят о высокой буферности системы. Отличие микроорганизмов от высших организмов состоит в том, что их количество может быть совсем не пропорционально их реальному воздействию на экосистему и не пропорционально интенсивности проводимых ими процессов. Количество же животных и растений, а также их биомасса в гораздо большей степени пропорциональны их вкладу в круговорот вещества и энергии в экосистеме.

Большие потенциальные возможности говорят, как правило, о большей способности системы сохранять равновесие при изменяющихся внешних воздействиях. В этом отношении экосистемы с высокой потенциальной биологической активностью могут быть устойчивее. Однако гипертрофированная полевая (реальная) биологическая активность скорее ведет к разрушению экосистемы, чем к ее поддержанию. Для естественных экосистем должен быть характерен свой оптимум микробиологической реальной активности, и выход за его пределы как в сторону понижения, так и в сторону повышения вреден. Определение средней реальной биологической активности, характерной для данной почвы, крайне необходимо, так как оно позволило бы устанавливать повреждения в функционировании комплекса почвенных микроорганизмов. Оптимумы полевой активности в естественных условиях меняются по сезонам, поэтому определение среднего оптимума реальной активности весьма затруднительно. Среднюю потенциальную биологическую активность почв по тому или другому показателю определить легче, так как эта величина более стабильная.

В общем случае колебания численности, биомассы микробных клеток, биологической активности всего лишь более или менее плавные отклонения от определенного минимума, который можно рассматривать как пул, характерный для данной почвы (например, количество микроорганизмов, которое почва может поддерживать в наиболее неблагоприятные для их развития периоды). Величина пула не зависит от случайных колебаний температуры, влажности, поступления растительных остатков. Она обусловлена типом почвы с присущими ему физическими и химическими свойствами, формирующимися в процессе почвообразования, а также факторами, которые приводят к изменению свойств почвы за относительно небольшие промежутки времени и обусловлены, как правило, антропогенными воздействиями (загрязнения, агротехнические и агрохимические мероприятия). Верхние пределы количества обусловлены в значительной мере непрогнозируемыми экологическими факторами – количеством осадков, изменением температуры почвы, поступлением органического вещества. Они могут совпадать для разных типов почв. Таким образом, при определении среднего значения для данного фактора в заданной почве они будут в большей мере отражать экологические условия периода наблюдений, чем свойства, присущие данному почвенному типу. Для определения минимального пула необходимо экспериментально установить наименьшее значение показателей. В дерново-подзолистой почве для этого необходимо не более 10 суток во время вегетационного периода при ежедневных определениях.



Особо надо рассмотреть агроценозы, в которых интенсифицируют процессы для получения большого количества чистой продукции. В этом случае повышение актуальной биологической активности – явление необходимое и положительное, но в определенных пределах. Повышение скорости разложения растительных остатков и органических удобрений – явление положительное, а повышение интенсивности нитрификации и денитрификации при внесении азотных удобрений – вредное. Стратегия развития экосистем, идущих к климаксным сообществам, и стратегия сельского хозяйства различны. Если развитие экосистемы ведет к снижению чистой продукции, то сельское хозяйство стремится к получению максимального урожая. В связи с этим перестройка интенсивности микробиологических процессов, протекающих в почвах, занятых сельскохозяйственными угодьями, – явление вполне закономерное.

По потенциальной биологической активности мы, вероятно, должны любой комплекс почвенных микроорганизмов, находящихся в той или иной почве, рассматривать как климаксный (самый высокий в биосфере генофонд, потенциально узкая специализация по экологическим нишам, высокая потенциальная способность к поддержанию гомеостаза). Однако реализация этих возможностей будет идти совсем по-разному в зависимости от условий, и микробный комплекс может функционировать и как молодая, и как старая экосистема не только в зависимости от стадии сукцессии высших растений, но и от сезона и конкретных условий почвенной микрзоны.

### **Концепция комплекса почвенных микроорганизмов**

Представление о комплексе почвенных микроорганизмов вводится взамен понятия “микробоценоз”, которое является не вполне удачным, так как в почве часть микроорганизмов связана с растениями, часть – с животными и нет функционально единой изолированной системы микроорганизмов (микробоценоза). Рассматриваемая концепция отрицает идею о глобальной строгой и жесткой организованности почвенных микроорганизмов в единую систему.

### **Концепция микробного пула**

Гомеостаз в почве поддерживается с помощью механизмов, основанных в первую очередь на микробном пуле. В почвах всегда имеется избыточный пул (запас) микробов, не обеспеченных органическим веществом и другими элементами питания. Благодаря наличию этих лимитирующих факторов непрерывное развитие и размножение микроорганизмов не осуществляются. Первым лимитирующим фактором в развитии почвенных гетеротрофных микроорганизмов является недостаток органического вещества, и отчасти других питательных веществ, особенно фосфора. Температура и влажность в качестве лимитирующих факторов выступают на протяжении определенных отрезков времени (зима, летняя засуха), но не влияют на валовую минерализацию органического вещества. В климаксных системах, как известно, все синтезируемое в экосистеме органическое вещество разлагается, и запас органического вещества остается постоянным.

При построении комплекса почвенных микроорганизмов выполняется общий закон развития экосистем – сукцессия движется по пути поддержания единицы энергии все большей биомассы организмов. Это правило оказывается справедливым и для почвенных микроорганизмов. Особенно четко это проявля-

ется в том случае, если потенциальный пул микроорганизмов рассматривается как климаксная система комплекса почвенных микроорганизмов. На протяжении всего развития почвенной микробиологии представления о численности микроорганизмов в почве, т.е. о ее микробном пуле, сильно изменилось, причем определяемая численность все время увеличивалась. Сначала применяли метод посева на питательные среды и, таким образом, учитывали сравнительно немного микроорганизмов. Количество бактерий определялось млн клеток на 1 г почвы. Применение прямого микроскопического метода Виноградского позволило учесть в почве в тысячи раз больше бактерий: от сотен млн до 1–2 млрд на 1 г почвы. Использование люминесцентной микроскопии в отраженном свете еще увеличивало учитываемое количество микроорганизмов. По методу Виноградского часть клеток нельзя было учесть из-за адсорбции их на почвенных частицах и агрегатах. Электронная микроскопия позволила выявить в почве ультрамикроскопические формы, и, таким образом, определяемая численность почвенных микроорганизмов еще возросла. По нашим данным количество бактерий в почвах составляет от 1 до 10 млрд, а иногда даже нескольких десятков млрд клеток на 1 г почвы, суммарная длина грибных гиф равняется сотням и тысячам метров на 1 г почвы. Кроме того, в почве находится большое количество гиф актиномицетов, а также более крупные микроорганизмы (водоросли, простейшие животные, другие беспозвоночные животные и т.д.). Вес живой биомассы на 1 га может составлять для бактерий от сотен до нескольких тысяч кг, а для грибов – от сотен кг до десятков тонн на 1 га.

Масса сухих микроорганизмов, одновременно содержащихся в почве, составляет для богатых почв 5–10 т/га. Чистая первичная продуктивность сообществ известна и составляет для продуктивных сообществ 20 т/га. По последним определениям к чистой первичной продукции, учтенной старыми методами, нужно прибавить 20–30% (корневые выделения и корневой отпад, которые почти полностью используются микроорганизмами ризопланы и ризосферы). Большинство микроорганизмов в почве представлено гетеротрофами и большая часть энергии тратится на поддержание биомассы микроорганизмов. Комплекс почвенных микроорганизмов выполняет свои экологические функции и проводит процессы превращения не только при росте и размножении микроорганизмов, но, подобно другим организмам, и в процессе поддержания клеток, на что тратится большая часть органического вещества.

Таким образом, расчеты показывают, что почва в целом на протяжении большей части времени представляет собой среду, слабо обеспеченную доступными органическими веществами в расчете на имеющийся пул микроорганизмов.

Почвы в экологическом отношении представляют тип местообитания с рассеянным доступным органическим веществом, с большим и разнообразным пулом только в небольшой своей части активных микроорганизмов. При этом проявляются специфические приспособления для переживания длительных периодов, неблагоприятных для развития (способность усваивать вещества из рассеянного состояния, адсорбироваться на частицах, где происходит накопление питания, переходить в состояние глубокого анабиоза, особая характеристика кинетики роста).

С экологической точки зрения необходимо установить функции микробного пула, этого важного, по нашему мнению, приспособления для поддержания гомеостатического состояния в почве. Известно, что каждый тип почвы имеет характерное для него содержание гумуса, ряда нерастворимых и растворимых органических веществ (полисахаридов, липидов, белков, сахаров, органических кислот и спиртов, аминокислот, витаминов и ферментов). Характерны также содер-

жание ряда неорганических веществ (нитратов, аммония, подвижного фосфора, закисного и окисного железа), определенные окислительно-восстановительные условия и рН со специфическим распределением их по микрозонам. В поддержании отмеченных факторов большое, а часто и решающее значение имеет жизнедеятельность микроорганизмов. При возникновении сдвигов в системе, например поступлении свежего органического вещества в виде растительных остатков или внесении азотных удобрений, в процессы их трансформаций включаются микроорганизмы, которые должны привести систему в состояние равновесия. Большой пул микроорганизмов в почве необходим по следующим причинам. Горизонтальное и вертикальное перемещение микроорганизмов в почве затруднено из-за адсорбции микроорганизмов почвенными частицами и сложности их передвижения по мелкопористой системе, каковой является почва. Между тем органическое вещество, как и другие вещества, поступает в определенные микро- и мезозоны почвы совершенно случайно. Поэтому, чтобы обеспечить переработку веществ, в каждой мезо- или даже микрозоне должен быть полный набор микроорганизмов, необходимых для переработки всех поступающих в почву веществ. В разное время в данном месте могут возникнуть разные зоны: аэробная или анаэробная, с низкими или высокими температурами, с резко изменяющимися значениями рН и пр. Каждый небольшой объем почвы должен содержать микроорганизмы, не только разлагающие органические вещества (целлюлозу, лигнин, хитин и др.), но и осуществляющие другие необходимые процессы (азотфиксацию, аммонификацию, гидролиз органофосфатов, трансформацию ряда органических и минеральных соединений, минералов и т.д.).

Небольшие по расстоянию миграции микроорганизмов в почве возможны, и, благодаря наличию у микробов таксисов, они осуществляются целенаправленно.

Микроорганизмы обладают способностью при благоприятных условиях чрезвычайно быстро размножаться. Пул дает микроорганизмам возможность быстрее реагировать на изменившиеся условия и таким образом способствовать более тонкому регулированию гомеостаза и быстрейшему его достижению. Первоначальное содержание микроорганизмов весьма важно для быстрого достижения достаточного уровня клеток, необходимого для ликвидации происшедшего в системе сдвига.

В природных условиях пул микроорганизмов особенно увеличивается в тех экосистемах, в которых условия для протекания микробиологических процессов оказываются неблагоприятными, например в высокогорных почвах, где лето очень короткое и гидротермические условия неблагоприятны для развития микроорганизмов. Количество микроорганизмов велико и в почвах тундры.

Пул почвенных микроорганизмов отличается не только большой численностью, но и огромным разнообразием. По микробному генофонду почва, вероятно, самый богатый субстрат. Недаром при поисках микроорганизмов-продуцентов определенных ценных веществ (антибиотиков, витаминов, ферментов, аминокислот) в большинстве случаев обращаются к почве, как наиболее надежному источнику разнообразных микробов.

Другая важная функция пула состоит в том, что он обеспечивает выживание каждого вида микроорганизмов. Почва представляется средой весьма гетерогенной, со множеством различных микрозон. Только в части этих микрозон в определенном интервале времени создаются условия, благоприятные для размножения и выживания определенного микроорганизма. Для выживания микробов в почве в начале неблагоприятного периода общее количество клеток должно быть большим. Тогда они будут находиться во многих микрозонах и хотя бы часть их выживет.

С точки зрения функции в почве следует различать два пула микроорганизмов. На более высоком уровне организации почвы – пул, имеющий существенное значение для микробиологических процессов, протекающих в почве (в этом случае количество клеток бактерий должно быть больше 1 млн на 1 г почвы). Второй пул обеспечивает главным образом выживание разных видов микроорганизмов в почве. Во втором пуле численность клеток гораздо меньше, но он велик в видовом отношении. Он не имеет существенного значения в метаболических процессах на данной стадии сукцессии, но может оказаться необходимым для обеспечения процессов на других стадиях сукцессии при изменении экологических условий.

Следует отметить, что сама почва как среда обитания построена таким образом, что она чрезвычайно благоприятна для выживания пула микроорганизмов.

### Концепция пула метаболитов

В почве все время поддерживается пул легкодоступных органических веществ. В ней только сравнительно небольшое количество зачатков микроорганизмов находится в состоянии глубокого покоя (эндоспоры бактерий, споры грибов и актиномицетов). Почва является идеальной средой для поддержания микроорганизмов. В этом важную роль играет пул внеклеточных метаболитов, который подобно пулу внутриклеточных метаболитов способствует выживанию микробных клеток в неблагоприятных условиях. В почве все время находится некоторое количество сахаров, органических кислот и спиртов, аминокислот, пуриновых и пиримидиновых оснований и т.д. Этот пул не дает погибнуть микробам в периоды, когда в данную почву или в данную микрону не поступают свежие органические вещества.

В почве имеется механизм для поддержания пула метаболитов на определенном уровне. Он основывается на запасе внеклеточных иммобилизованных гидролитических ферментов, благодаря работе которых пул простых органических веществ пополняется в результате гидролиза гумуса и других органических полимеров, имеющихся в почве. Пул гидролитических ферментов обеспечивает пул простых органических веществ, а последний дает возможность существовать в почве колоссальному пулу микроорганизмов. При оптимальных для ферментативного процесса условиях он может переработать за сутки или несколько суток такое количество веществ, которое поступает в почву в естественных условиях за год. Об этом свидетельствуют результаты опытов по определению ферментативной активности почв с помощью обычно применяемых методов. Это подтверждают подсчеты возможного поступления тех или иных веществ в почву за год (например фосфорорганических соединений, нуклеиновых кислот, белков и т.д.). Ферментов в почве очень много, особенно гидролитических, и, казалось бы, в ней не должен накапливаться субстрат, т.е. биополимеры и другие соединения, которые могут подвергаться воздействию гидролаз, но это не так. Все дело в том, что на протяжении длительных отрезков времени существуют крайне неблагоприятные условия для проявления ферментативной активности (низкие температуры, низкий потенциал влаги). Однако самое главное – это разобщенность в почве фермента и субстрата. Фермент адсорбирован (иммобилизован) в одних микронеонах, а субстрат – в других. Иногда адсорбированный субстрат вообще недоступен для фермента, так как закрыт минеральным гелем ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  или другими веществами).

## Принцип дублирования

Каждый существенный физиолого-биохимический процесс в почве строится на функционировании нескольких дублирующих друг друга микроорганизмов. Известно, что такой важный процесс, как разложение целлюлозы, осуществляется самыми разными в систематическом отношении микроорганизмами – грибами, миксобактериями, актиномицетами, аэробными и анаэробными бактериями. Причем представители многих перечисленных групп находятся в каждой почве. Если раньше предполагалось, что азотфиксацию осуществляют только клубеньковые бактерии, азотобактер и клостридий, то в настоящее время с помощью ацетиленового метода показано, что этот процесс проводится очень многими и весьма различными, правда только прокаротиными, микроорганизмами: аэробными и анаэробными бактериями, автотрофами и гетеротрофами, синезелеными и другими фотосинтезирующими бактериями.

Долгое время процесс нитрификации приписывался исключительно узкой группе хемолитотрофных нитрифицирующих бактерий. В настоящее время хорошо изучена так называемая гетеротрофная нитрификация, которая в широких масштабах вызывается рядом грибов и гетеротрофных бактерий. Гидролиз органофосфатов и перевод труднорастворимых фосфатов в доступную для организмов форму опять же осуществляются разными группами микроорганизмов. Разнообразнейшие микроорганизмы участвуют в окислении железа и марганца и в их восстановлении. Широкий ряд организмов принимает участие в разрушении силикатов и алюмосиликатов и в синтезе новых минералов. Представления об узости функции определенных микроорганизмов были явно преувеличены. Для удобства изучения микроорганизмы были разбиты на физиологические группы, например азотфиксаторы, денитрификаторы, нитрификаторы, аммонификаторы, целлюлозолитические, сахаролитические, пектинолитические, протеолитические и т.д. Исследователь, изучив какой-либо процесс, осуществляемый микроорганизмом и часто являющийся для его жизнедеятельности только одним из многих необходимых процессов, называл даже микроорганизм по тому процессу, который был обнаружен.

Все это имеет свои закономерные исторические причины, но в дальнейшем вольно или невольно происходила абсолютизация представлений и складывалось мнение, что *Azotobacter* spp. – основной азотфиксатор в почвах, *Ps. denitrificans* – основной денитрификатор и *Metallogenium* sp. – основной рудообразователь. Однако по мере изучения новых микроорганизмов стало ясно, что каждая из перечисленных функций широко распространена среди почвенных микроорганизмов. Хуже обстоит дело с множественностью физиологических функций каждого микроорганизма. В последнее время выяснилось, что нет отдельных физиологических групп бактерий азотфиксаторов и денитрификаторов. Один и тот же микроорганизм проводит тот или иной процесс в зависимости от конкретных условий окружающей среды. При наличии органического вещества и недостатке связанного азота в среде происходит азотфиксация. Если же имеется органическое вещество при избытке связанного азота и недостатке кислорода – идет денитрификация. Отметим, что чрезвычайно важно было бы установить, насколько отличаются окислительно-восстановительные условия (концентрация кислорода) для протекания этих двух процессов. Если тот же микроорганизм азотфиксатор-денитрификатор в процессе своего роста использует белки или аминокислоты, то он становится аммонификатором. Обычно он может проводить и гетеротрофную нитрификацию. Таким образом, генетические

возможности микробов оказываются весьма обширными и скорее нужно говорить о физиологических процессах, проводимых микроорганизмами, а не о физиологических группах микробов. Многие микробиологи-экологи считают, что имеются специфические группы микроорганизмов, использующие определенные органические вещества. Особенно это касается грибов. Существует мнение о наличии специфических групп сахаролитических, пектинолитических, целлюлозолитических грибов. Но такое деление во многом условно. В отношении сахаролитических грибов нужно заметить, что вообще нет микроорганизмов, которые не обладали бы гидролазами. Поэтому наряду с использованием сахаров и других мономерных органических соединений сахаролитические грибы могут использовать и некоторые полимеры, особенно крахмал, белки и т.д. Кроме того, гидролазы всегда содержатся в почве, и микроорганизмы могут использовать для своей жизнедеятельности "чужие" гидролазы. Даже микроорганизм, который обладает специфическими гидролазами типа целлюлаз, вполне может использовать ряд мономеров.

Из сказанного, конечно, нельзя делать вывод об отсутствии физиологических различий между микроорганизмами, однако на данном этапе развития экологии микроорганизмов нужно подчеркнуть полифункциональность каждого вида микроорганизма. Принцип дублирования в проведении определенных физиолого-биохимических процессов широко распространен. Чем больше дублеров, тем быстрее идет процесс (разложение сахаров, спиртов, органических кислот). Чем меньше дублеров, тем медленнее идет процесс (разложение фенола, анилина, нафталина, ряда пестицидов и т.д.).

Принцип дублирования весьма широко действует в почвах и, очевидно, дает возможность более точно и тонко поддерживать гомеостаз даже в изменяющихся физико-химических условиях.

Принцип дублирования касается того или иного важного процесса (азотфиксации, нитрификации, разложения целлюлозы, фосфорорганических соединений), а также синтеза ряда веществ (различных групп гидролитических ферментов, меланинов и меланоидов, принимающих важное участие в гумусообразовании, витаминов и т.д.). Аналогичные процессы происходят в аэробных и анаэробных условиях, при низких и высоких температурах разными систематическими группами микроорганизмов.

Принцип дублирования может быть в некоторой степени распространен и среди низших таксономических групп микроорганизмов. Например, можно утверждать, что в каждой почве встречаются и одновременно функционируют виды микроорганизмов-дублеров. Таким образом, для почвы, взятой в целом, как бы не соблюдается правило Гаузе о том, что два вида не могут занимать одну и ту же нишу в экосистеме. Но правило Гаузе в совокупной массе почвы и не должно действовать, так как почва представляет собой множество экологических ниш, разделенных в пространстве и во времени. В разных частях почвы как чрезвычайно структурированного биотопа микробные ассоциации функционируют относительно изолированно.

Принцип дублирования тесно связан с принципом пула микроорганизмов.

### **Принцип обратимости микробиологических процессов**

Любой процесс превращения вещества микроорганизмы ведут в двух взаимно противоположных направлениях. Обычно микроорганизмы разлагают органические вещества с выделением  $\text{CO}_2$ . Однако в процессе автотрофной и гетеротрофной фиксации они связывают  $\text{CO}_2$  в органические вещества. Микроор-

ганизмы разрушают белки, целлюлозу, хитин, но они и образуют все эти соединения. Микробы совершают противоположные процессы – азотфиксацию и денитрификацию. Они осуществляют восстановление и окисление соединений азота, а также окисление и восстановление всех элементов с переменной валентностью (железа, серы, марганца, сурьмы). Иногда противоположные процессы совершает один и тот же микроорганизм, иногда – разные. Следует особо подчеркнуть, что в этом удивительном свойстве микроорганизмов заложена основа их тонкой способности к поддержанию гомеостаза в экосистемах, и в частности в почве. Равновесие устанавливается не по принципу простого химического равновесия, а более сложным образом.

### **Принцип множественного лимитирования**

В почве, взятой в совокупной массе, благодаря ее микроразнообразию, наблюдается множественное лимитирование, т.е. лимитирование по нескольким или множеству факторов. В почве почти всегда имеются микроразнообразия с недостатком органического вещества, азота, фосфора, калия, кальция, микроэлементов и т.д. Поэтому иногда наблюдается явление, при котором внесение в почву любого из этих органических веществ и насыщение им всех микроразнообразий приводят к развитию в ней дополнительного количества микроорганизмов. Вероятно, возможно наличие двойного или даже множественного лимитирования и в некотором числе отдельных микроразнообразий. Последний вопрос в настоящее время исследуется в экспериментах по проточному культивированию микроорганизмов, но для почвы он пока не ясен.

### **Концепция ненасыщенности комплекса почвенных микроорганизмов**

Правило Бейеринка в отношении микроорганизмов гласит: “все есть везде” и “среда отбирает”. Очевидно, это правило нельзя понимать в буквальном смысле. Работы ряда авторов, и особенно советских ученых показали, что для разных почв характерны разные ассоциации (комплексы доминирующих почвенных микроорганизмов). В ряде почв определенные микроорганизмы не обнаруживаются. Это относится к азотобактеру, клубеньковым бактериям, ряду актиномицетов и грибов. Существующие микробиологические методы дают возможность обнаруживать тот или иной микроорганизм в почве только при довольно высоком уровне его содержания. Иногда это миллионы, а в лучшем случае тысячи или даже сотни тысяч клеток на 1 г почвы. Кроме того, во многих случаях клетки могут не обнаруживаться даже при их большом содержании. Это обусловлено отсутствием достаточно селективной среды, незнанием оптимальных условий для выделения, нахождением клеток в состоянии стресса, адсорбцией клеток почвенными частицами. Кроме того, данный вид может существовать в почве в измененной форме. Возможно наличие у клеток глубокого покоя и катаболитной репрессии, из которых их не удастся вывести. Существуют также помехи при выделении со стороны сопутствующих микроорганизмов, мешающее действие твердых почвенных частиц при посеве из малых разведений и т.д. Таким образом, пока нельзя достаточно достоверно утверждать, что определенный микроорганизм в данной почве абсолютно отсутствует. Тем более, что для почвы характерна чрезвычайная мезо- и микроразнообразность, и микроорганизмы могут не быть в одних

навесках, отобранных для анализа, но они могут присутствовать в значительных количествах в других навесках. К сказанному следует прибавить трудности, возникающие из-за резких сезонных, а также сукцессионных колебаний численности видов. Неопределенность самого понятия вида микроорганизма также затрудняет получение точного ответа на вопрос о наличии или отсутствии микроорганизма в данной почве. Таким образом, проверка правила Бейеринка в абсолютном его понимании представляется в настоящее время весьма затруднительной или даже невозможной. Однако положение о том, что многие виды микроорганизмов, если и присутствуют, то в очень малом числе, и не встречаются в количествах, превышающих сотни клеток на 1 г, не вызывает сомнения. Если определенные микроорганизмы и отсутствуют в почве, то они должны время от времени привноситься в нее благодаря широко распространенной воздушной дисперсии почвенных микроорганизмов. Достаточно вспомнить пыльные бури, во время которых переносятся тысячи тонн почвы, чтобы представить масштабы перемещения почвенных микроорганизмов. Причем установлено, что подавляющее большинство их при перенесении по воздуху с почвенными частицами, а часто и внутри почвенных агрегатов, сохраняет свою жизнеспособность. Таким образом, каждая почва на Земле на протяжении определенного отрезка времени, длительность которого, к сожалению, неизвестна (годы, десятки, сотни, тысячи лет), получает все или почти все микроорганизмы.

Конкретные условия среды определяют, будут ли эти принесенные микроорганизмы входить в пул доминирующих или в пул переживающих микроорганизмов или вообще будут вымирать.

Очень долго господствовало мнение, что “посторонний микроорганизм”, попадающий в почву, как правило, быстро погибает. Однако исследования, проведенные в последнее время, показали, что внесенный микроорганизм, которого не было в почве (или он присутствовал в неопределяемо малом количестве), после внесения обычно стабилизируется на определенном уровне и долго сохраняется в почве. При внесении в почву различных видов микроорганизмов случаи гибели определенного вида отмечаются довольно редко, причем в первую очередь проявляется неблагоприятное действие кислотности. В то же время внесенный микроорганизм никогда не занимает господствующего положения среди других микроорганизмов.

Это свойство и описывается как “ненасыщенность комплекса почвенных микроорганизмов”. В этот комплекс на довольно высокой популяционной плотности могут входить новые члены, причем эти популяции находятся не в состоянии покоя, а в динамическом равновесии, т.е. постоянно некоторое количество клеток отмирает и такое же количество появляется вновь. Количественно определить размеры смертности и рождаемости клеток в популяции весьма сложно, но решение этой проблемы позволило бы сделать популяционные подходы еще более ценными. Пока о размножении клеток можно только судить микроскопически или по образованию колоний, относительными методами определить количество живых и мертвых клеток.

Вполне возможно, что в ряде случаев мы имеем дело с покоящимися и переживающими клетками, а не с активно размножающимися. Это может быть постепенно вымирающая популяция, причем процесс вымирания растягивается на месяцы и годы. Известно, что клубеньковые бактерии погибают через три-пять лет или, по крайней мере, за это время их численность резко падает.



Способность популяции длительно сохраняться можно использовать для практических целей. Микроорганизмы могут сохраняться, а затем проявить свою активность в специфической экологической нише, например внутри растения (клубеньковые бактерии, микоризные грибы, фитопатогены и т.д.). Способность длительно сохраняться ставит под сомнение целесообразность внесения в почву каких-либо “полезных” микроорганизмов, которые, как предполагается, должны проявлять активную деятельность в почве (свободноживущие азотфиксаторы, микроорганизмы, разрушающие нефтяные загрязнения). Если бы определенный микроорганизм мог достигнуть в почве доминирующего положения, он его достиг бы и без внесения. Особый случай представляет внесение микроорганизмов одновременно или после изменения общей экологической обстановки. После изменения параметров экосистемы внесение микроорганизма может ускорить его появление, однако, как правило, комплекс почвенных микроорганизмов очень многообразен, и в нем самом находятся микроорганизмы, которые с наибольшим эффектом занимают новые экологические ниши. В то же время внесение одного какого-либо “полезного” микроорганизма ничего не может дать, так как его ниша заведомо будет очень ограничена, и он войдет как малая доля в число сотен видов. Если даже, предположительно, микроорганизм займет господствующее положение (что, видимо, происходит очень редко, если вообще происходит), то это означает гибель экосистемы. Такое явление в гидробиологии называют “цветением”. При господстве одного микроорганизма комплекс почвенных микроорганизмов, конечно, не может выполнять все многообразие функций, которые он берет на себя в естественных биогеоценозах.

Обычно среда обитания имеет определенную емкость, выше которой данная популяция в этой среде не поднимается. В почве всегда есть незаполненные микроорганизмами микрозоны. Из-за этого в почве и сохраняется органическое вещество.

### **Концепция почвы как множества сред обитания микроорганизмов**

С микробиологических позиций почва представляет собой крайне гетерогенную среду и не может рассматриваться как единая однородная среда обитания. Благодаря своей структурированности и микрозональности она должна рассматриваться как набор совершенно различных микро- и мезосред, в каждой из которых создаются совершенно различные и часто прямо противоположные условия для развития отдельных групп микроорганизмов. Множество таких микросред может находиться в каждом грамме почвы. Микро- и мезозоны разделены в пространстве и во времени. Микроорганизмы – это как раз такие организмы, которые адаптированы к развитию в микрозонах. Микроскопические размеры дают им возможность осваивать микросреду. Способность быстро размножаться и быстро переходить к покою или крайне замедленному метаболизму дает им возможность за короткий срок освоить микрозону и выжить при исчерпании запасов питания. Микрозоны могут быть очень небольшими и занимать всего несколько десятков или несколько сотен кубических микрометров. Часто при этом в микрозоне развивается одна микроколония, состоящая из нескольких десятков клеток одного вида. Иногда такие зоны имеют значительные размеры, например кусок разлагающихся растительных остатков. Они могут иметь большую протяженность при небольшой толщине, например поверхность однородного участка корня (ризоплана).

Микрозональность основывается на локальном поступлении органических остатков и корневых выделений, а также на микрозональности распределения физико-химических условий (окислительно-восстановительного потенциала, рН, концентрации элементов питания и т.д.), минералогических факторов.

Несмотря на огромное количество микроорганизмов, содержащихся в почве (млрд на 1 г), оказывается, что клетки, как правило, собраны в микроколонии, разделенные пустыми пространствами, которые по площади в сотни и тысячи раз превосходят пространства, занятые микроорганизмами. Таким образом, микроколонии, состоящие из клеток одного или нескольких видов, могут развиваться сравнительно изолированно. Отсюда следует важный вывод о том, что в почве часто развиваются чистые микрокультуры микроорганизмов. Это положение было подтверждено экспериментально при изучении разных почв с помощью люминесцентной микроскопии. Пространства, разделяющие микроколонии, настолько велики по сравнению с размерами самих колоний, что трудно ожидать их тесного взаимодействия. Следовательно, изучение чистых культур имеет более прямое отношение к почвенной микробиологии, чем считалось ранее. Основной вопрос, который в настоящее время нуждается в разрешении, следующий: насколько развитие в микрокультуре (микроколонии) соответствует развитию в макрокультуре (макроколонии)? Если такое соответствие можно признать достаточно полным, то данные, полученные в лабораторных условиях на чистых культурах, можно переносить и на почвенные условия. Если развитие в тонких пленках воды, в капиллярах, а также просто в микрокультурах отличается (например, есть сведения, что микрокультуры клостридиума не образуют ботулина), то необходимо разрабатывать методы для изучения микрокультур. Конечно, метод чистых культур дает возможность изучать только генетические возможности культуры, а конкретное фенотипическое проявление будет зависеть от экологических условий.

В связи с концепцией микрозональности становятся понятными многие аспекты строения и функционирования комплекса почвенных микроорганизмов. Один из важных вопросов состоит в связи микрозональности с широким географическим распространением каждого вида микроорганизма. Дисперсия микроорганизмов, особенно воздушная, обеспечивает попадание всех почвенных микроорганизмов во все почвы. Если учесть, что среда обитания микроорганизмов является микросредой, которая может быть прерывистой во времени, то понятно, что все или почти все почвенные микроорганизмы могут выживать в некоторых микрозонах любых почв ("все есть всюду" – правило Бейеринка). Однако в глобальных процессах круговорота веществ существенное экологическое значение будут иметь не все почвенные микроорганизмы, а только те, которые многочисленны и проявляют активную жизнедеятельность (пул высокого уровня). При проведении экологических исследований в большинстве случаев нет необходимости устанавливать все существующее в почве разнообразие микроорганизмов, а достаточно ограничиться установлением доминирующих в важных экологических процессах форм. Таким образом, критерии доминирования приобретают первостепенное значение для почвенной микробиологии, причем имеется в виду не только и не столько численное доминирование, а доминирование в проведении процессов. В одних случаях, это могут быть такие глобальные процессы, как разложение целлюлозы или азотфиксация, а в других случаях – синтез определенного витамина или определенной аминокислоты. К сожалению, в настоящее время в большинстве случаев почвоведы-микробиологи могут

учитывать только численность определенных форм микроорганизмов в почве, да и то с большим трудом и с большими погрешностями. Интенсивность процессов, вызываемых определенным видом, почти не поддается определению. Комбинация методов иммунолюминесценции и авторадиографии позволяет не только видеть клетки определенного штамма микроорганизма в нестерильной почве, но и оценить активность каждой обнаруженной при микроскопии клетки. Но такие случаи редки, а методики сложны и трудоемки. В связи с этим часто приходится довольствоваться условными критериями численности. Для бактерий может быть принят условный критерий, который гласит, что существенное экологическое значение бактерии имеют в том случае, если число их клеток не менее 1 млн на 1 мл или 1 г субстрата, хотя бы в какой-то сезон.

Поиски более редких бактерий могут иметь значение для индикации почв и других целей, но мало дают для оценки процессов, происходящих на данном этапе развития экосистемы. Для грибов, дрожжей, водорослей и т.д. необходимо разрабатывать свои критерии экологической значимости, учитывая количество микроорганизмов, их размеры и интенсивность метаболизма. Поскольку эти организмы по массе в 100 раз более крупные, чем бактерии, то для них может быть принят критерий 10 тыс. на 1 г.

Физиологически активные вещества в почве (антибиотики, токсины, витамины, аминокислоты, стимуляторы и ингибиторы роста растений) важны для развития микроорганизмов в микроразонах. В то же время их глобальная регулирующая роль в масштабах всей почвы, хотя и провозглашалась рядом авторов, нуждается в дальнейшем экспериментальном подтверждении или опровержении. Первое место в качестве таких регуляторов, очевидно, могут занимать газообразные вещества, так как они наиболее быстро диффундируют и могут передавать информацию, являясь “средовыми гормонами”. Действие физиологически активных веществ, в том числе газов или летучих органических веществ, в качестве средовых гормонов легко обнаружить в искусственных условиях, когда в почву вносятся большие количества органического вещества и она перестает функционировать как система микросред и действует как единая система, т.е. переходит в другой тип микробных экосистем. Такое состояние возможно для больших частей естественной почвы на небольших отрезках времени, но оно не характерно для всей массы почвы. В почве имеются определенные зоны, функционирующие по другим законам. Прежде всего это зона ризоплан и в какой-то мере ризосферы, а также подстилка в лесу, степной войлок, разлагающийся торф и т.д. В этих случаях можно ожидать и искать большую организованность процессов, чем в других частях почвы.

Важным открытием, которое должно использоваться в экологии почвенных микроорганизмов, является кометаболизм у микроорганизмов. Установлено, что микроорганизмы могут разрушать ряд труднодоступных веществ, в том числе и неприродные органические вещества.

Принципы строения и функционирования комплекса почвенных микроорганизмов должны широко использоваться при разработке критериев целостности и повреждения этого комплекса в связи с применением удобрений, пестицидов, загрязнением почвы, а также при решении вопросов о целесообразности внесения в почву тех или иных “полезных” микроорганизмов или регулирования комплекса почвенных микроорганизмов путем изменения среды обитания.

## Глава 5

### РОЛЬ МИКРООРГАНИЗМОВ В БИОЦЕНОТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЯХ ПОЧВ

Анализ разнообразных функций почв как в отдельных экосистемах, так и в биосфере в целом, получил признание и начал активно развиваться в последние два десятилетия. Этим же отрезком времени характеризуется формирование в почвенной микробиологии нового направления, связанного с изучением функций микроорганизмов и микробных сообществ в наземных экосистемах. Об этом свидетельствует появление в 1980-е гг. сборников “Микроорганизмы как компонент биогеоценоза” и “Почвенные организмы как компоненты биогеоценоза”. В 1982 г. в Алма-Ате было проведено Всесоюзное совещание под тем же названием, а в 1985 г. на VII съезде Всесоюзного микробиологического общества была организована специальная секция, посвященная проблемам экологии, геохимической деятельности микроорганизмов и охраны окружающей среды. В 1986 г. микробиологи приняли участие во II Всесоюзном совещании “Общие проблемы биогеоценологии”, а в 1987 г. в



Рис. 16. Биогеоценологические функции почвы

Хабаровске было проведено Всесоюзное совещание “Микробиологическая деструкция органических остатков в биогеоценозе”. В это же время появились зарубежные исследования и обзоры, посвященные проблемам экологии почвенных микроорганизмов.

Биогеоценологический подход к изучению биоты пробудил интерес почвенных микробиологов к проблемам пространственно-функциональной организации микробных сообществ в разных типах биогеоценозов (БГЦ), к анализу гетеротрофной части микробного населения почв как функционального ядра БГЦ, выполняющего важнейшую функцию – поддержание круговорота веществ и энергии в экосистеме.

Если же суммировать все экологические функции почвенных микроорганизмов, то они столь разнообразны и многочисленны, что входят в каждую из 16 типов биогеоценологических функций почв (рис. 16).

В некоторых случаях деятельность микроорганизмов в большой степени определяет биогеоценологические функции почв, например такие как почва – источник элементов питания, санитарные функции, трансформация почвой вещества и энергии.

Попытаемся последовательно проанализировать вклад микробиоты в каждую из категорий и типов биогеоценологических функций почв. Частично это уже сделано, однако многие функции почв рассматриваются без привлечения микробиологических данных; в других случаях приводимый материал ограничен, и его следует расширить.

### **Физические категории и типы биогеоценологических функций почвы**

**Жизненное пространство.** Концепция почвы как сложной полидисперсной трехфазной системы, выступающей в качестве среды обитания самых разнообразных групп животных, была разработана Гиляровым. Применительно к миру микроорганизмов понятие о почве как множестве сред обитания микроорганизмов было введено Звягинцевым. “Благодаря своей структурированности и микроразнообразности почва должна рассматриваться как набор совершенно различных микро- и мезосред, в каждой из которых создаются совершенно различные и часто прямо противоположные условия для развития отдельных групп микроорганизмов”. Автором было показано, что клетки микроорганизмов в почве, как правило, собраны в микроколонии, разделенные пустыми пространствами, превосходящими по площади сотни и тысячи раз пространства, занятые микроорганизмами. Поэтому микроколонии, состоящие из клеток одного или нескольких видов, могут развиваться сравнительно изолированно. Отсюда следует вывод о том, что изучение чистых культур микроорганизмов имеет прямое отношение и к почвенной микробиологии. В то же время прямые методы наблюдения за формированием “микробных пейзажей” дают материал, свидетельствующий о том, что зачастую в микроразнообразных зонах формируются очаги развития смешанных популяций, основанных, по-видимому, на межмикробных трофических взаимодействиях. Так, вокруг отдельных клеток водорослей или дрожжей, окруженных слизистой капсулой, образуется слой бактериальных клеток, утилизирующих капсульные полисахариды. Гетерогенная почвенная поверхность способствует локализации таких смешанных популяций и позволяет говорить о более тесных связях в межмикробных сообществах, чем в таксономически однородных группах.

**Жилище и убежище.** Для одних групп микроорганизмов почва является тем жилищем (местообитанием), где они активно функционируют и размножаются. Это характерные обитатели почвенного яруса БГЦ: из бактерий – это бациллы, стрептомицеты, артробактер, из дрожжей – липомицеты; грибы представлены комплексом разнообразных, типично почвенных видов, чаще всего это представители несовершенных грибов класса *Deuteromycetes*.

Для других групп микроорганизмов почва является ловушкой или временным убежищем, т.е. местом (локализацией), где они переживают неблагоприятные условия в анабиозе или близком к нему состоянии, в то время как их истинными эконизмами являются живые растения (их филлоплана и ризоплана) и их отмершие части, либо кишечник и экскременты почвенных беспозвоночных и другие субстраты. Примерами таких микроорганизмов могут служить все фитопатогенные бактерии и грибы, для которых истинным местообитанием является растение, а не почва; дрожжи элифитного комплекса особой жизненной формы фитобионтов, например, пигментные виды родов *Rhodotorula* и *Sporobolomyces* и дрожжи, ассоциированные с червями, многоножками, насекомыми; патогенные для человека и животных микроорганизмы.

**Опорная функция для биоты.** В создании и изменении опорной функции почвы и ее структуры участвуют и микроорганизмы. Известно положительное и отрицательное влияние микробиоты на механические свойства почв и грунтов. С одной стороны, микроорганизмы способствуют созданию почвенной структуры. Продукты жизнедеятельности микроскопических существ могут служить цементирующим веществом, склеивающим почвенные частицы в структурные элементы. Такими веществами являются внеклеточные слизи полисахаридной или полипептидной природы, образуемые многими почвенными бактериями, дрожжами, водорослями. Микробные полимеры, связанные с глинистыми минералами, образуют стабильные водопрочные агрегаты.

Считают, что особенно значима роль микроскопических грибов в структурировании почвы, так как грибы влияют на структуру не только посредством своих внеклеточных выделений, но и механически оплетают гифами почвенные частицы, скрепляя их. Преимущественная способность грибов (по сравнению с другими микроорганизмами) – формировать водопрочные агрегаты в верхнем почвенном горизонте, показана в модельных опытах на эродированных почвах. И, наконец, образование основного цемента почвенных агрегатов – гуминовых веществ – также происходит при существенном участии грибов.

Слизистые вещества чехлов, влагалищ и клеточных оболочек водорослей склеивают почвенные частицы, а переплетающиеся нити механически скрепляют их. На поверхности многих аридных почв нитчатые сине-зеленые водоросли родов *Microcoleus*, *Schizothrix*, *Phormidium* нередко развивают столь густую сеть, что мелкие частицы почвы оказываются прочно сцементированными нитями водорослей; поверхность почвы становится устойчивой против дефляции. Подобные явления наблюдаются при формировании такырной корочки.

Микроорганизмы могут отрицательно влиять на агрегаты почвы и грунтов. Многие микроорганизмы выделяют поверхностно-активные вещества, которые могут быть причиной дезагрегации почв и появления плавучих свойств грунтов.

**Функция сохранения и банк семян, микробных зачатков и личинок живот-**

ных. Представляется, что эта функция почвы должна быть расширена; следует выделить отдельным пунктом: “почва как банк, в котором хранятся самые разнообразные виды микроорганизмов, или как генофонд всего микромира”. В связи с этим разрабатывается проблема экологической оценки природных ресурсов микроорганизмов в почвах для биотехнологии. Поиск микроорганизмов с заданными свойствами производился ранее непродуктивно: либо методом массовой проверки коллекционных штаммов, либо случайным выделением из разных субстратов большого числа новых изолятов. Чтобы получить из природных хранилищ (прежде всего почв) штаммы микроорганизмов с целевым назначением в любой момент времени, необходимо иметь “адресные” данные каждого вида, т.е. тип почвы, горизонт либо слой подстилки, где обитает род или вид микроорганизма с ценными свойствами. Работы по экологическому исследованию микроорганизмов предлагается организовывать в разнообразных экосистемах, в первую очередь в ненарушенных (в заповедниках), которые будут выполнять функцию природных коллекций микроорганизмов. Такие материалы могли бы существенно дополнить серийные выпуски книг по группам микроорганизмов, используемых в биотехнологии; они выпускаются за рубежом под общим заглавием “Living Resources for Biotechnology”. Аналогичные выпуски перспективны и для России.

Вопрос о длительности сохранения в почве микроорганизмов в жизнеспособном состоянии продолжает привлекать внимание микробиологов. Исследования последних лет позволили выявить сохранение микроорганизмами жизнеспособности в почвах и породах, находящихся в мерзлом состоянии в течение сотен тысяч млн лет. Максимальное количество жизнеспособных микроорганизмов (1–9 млн клеток/г) зафиксировано в древних погребенных почвах. В погребенных торфяниках, часто маркирующих подошву олерской свиты и залегающих на глубинах 60–65 м, выявлено до 10 млн клеток на 1 г почвы. Несколько меньшее содержание микроорганизмов отмечалось в залегающих с поверхности голоценовых торфяниках. Численность микробных зародышей в осадочной толще закономерно убывала с их возрастом. Хлебникова с соавт. [1990] делают вывод о возможном проведении реконструкций палеоэкологических условий прошлых эпох по морфологическим и функциональным характеристикам микроорганизмов.

#### **Функции почвы, обусловленные ее физико-химическими и химическими свойствами**

**Адгезия почвенным мелкоземом микроорганизмов.** Эта функция почвы детально раскрыта в работах Звягинцева [1973]. Методы люминесцентной и электронной сканирующей микроскопии позволили автору установить, что большая часть почвенных микроорганизмов в естественных условиях адгезирована на почвенных частицах. Такое явление наблюдалось во всех исследованных почвах. Однако процент адгезированных клеток выше в богатых гумусом и тяжелых по гранулометрическому составу почвах. Самые мелкие частицы (1–5 мкм) содержат непропорционально большое количество клеток. Без адгезии микробы не могли бы нормально существовать в почве: адгезия помогает микроорганизмам удержаться в почвенном профиле и не подвергаться вымыванию в нижележащие горизонты; кроме того, адгезированные клетки оказываются на границе раздела твердого тела и жидкости, где сосредоточены основные питательные вещества.

Адгезия может как задерживать, так и стимулировать размножение микроорганизмов. Однако для протекания процессов разложения таких сложных полимеров, как целлюлоза, лигнин, гумус, адгезия микроорганизмов на этих субстратах является обязательным условием. Адгезированное состояние повышает устойчивость микроорганизмов к неблагоприятным воздействиям и позволяет им осуществлять основные функции, связанные с поддержанием гомеостаза и круговорота веществ в почве.

**Почва – источник питательных элементов и соединений.** Эта функция почвы относится к числу наиболее важных и наиболее изученных. Однако следует помнить, что практически все питательные вещества, усваиваемые корнями растений, связаны с микробными превращениями и микробным транспортом: они освобождаются либо в процессе переработки растительных и микробных остатков, либо в результате протекания окислительно-восстановительных процессов, осуществляемых также микроорганизмами. Извлечение из пород даже таких элементов, как фосфор, калий, железо, кремний, происходит в результате деструкции минералов различными группами литотрофных и органотрофных микроорганизмов. При этом воздействие на породу не ограничивается очагами развития соответствующих микробов, а проявляется косвенно – путем воздействия агрессивных органических кислот и полифенолов, образующихся в процессе разложения микроорганизмами растительных остатков, которые, фильтруясь через почвенную толщу, вызывают распад минералов.

С другой стороны, микроорганизмы и животные (так же как корни растений, подстилка и почва в целом) образуют биогеохимический барьер на пути таких элементов, как углерод, азот, фосфор, сера, кальций. В этом заключается одна из глобальных биосферных функций почвы – концентрировать питательные элементы в педосфере.

В питании растений особенно велика роль микроорганизмов ризопланы, так как микробы, населяющие поверхность корней, снабжают растение не только легкодоступными соединениями азота, фосфора и калия, но и различными физиологически активными веществами, стимулирующими рост растений: витамины, ауксины, гибберелины, цитокинины, фузикоцины. Вопросы взаимоотношения микроорганизмов с растениями в свете решения проблемы питания растений посвящены многие монографии, сборники, разделы учебников.

Особого внимания заслуживает анализ роли микроорганизмов в снабжении растений азотом. Известно, что в почве, гумусе и биомассе микроорганизмов содержится азота в десятки и сотни раз больше, чем в растениях и животных, вместе взятых. Однако этот азот находится в недоступной для растений форме, в виде сложных органических соединений, которые минерализуются очень медленно. Основной путь снабжения растений азотом состоит в фиксации атмосферного молекулярного азота прокариотными микроорганизмами. Этот процесс имеет планетарное значение, сопоставимое лишь с фотосинтезом, а проблема биологического азота стала одной из центральных проблем почвоведения и агрохимии.

Азотфиксирующие бактерии, или diaзотрофы, делятся по их связи с растениями на симбиотические и несимбиотические (свободноживущие). Симбиотические бактерии образуют клубеньки на корнях бобовых растений или таких деревьев и кустарников, как ольха, облепиха и др. Роль несимбиотических, но тем не менее зависимых от растений бактерий (так как бактерии получают от растений легкодоступные источники углерода и энергии) в процессе снабжения



растений азотом оказывается весьма значимой. Вопросы продуктивности азотфиксации, осуществляемой несимбиотическими бактериями и названной ассоциативной азотфиксацией, освещены Умаровым в книге “Ассоциативная азотфиксация”. Автором выявлена роль ассоциативной азотфиксации в азотном балансе различных биогеоценозов, рассматриваются микробные ассоциации, осуществляющие процесс фиксации атмосферного азота в прикорневой зоне и на поверхности растений.

В снабжении растений фосфором особую роль играет группа эукариотных (в отличие от азотфиксирующих прокариотных) микроорганизмов, в том числе и грибы, образующие микоризу на корнях как травянистых, так и древесных растений. Микоризные растения по сравнению с немикоризными утилизируют труднодоступные соединения фосфора. Благодаря грибам-микоризообразователям растения выносят из почвы не только фосфор, но и в значительно больших количествах азот и калий; улучшается снабжение растений за счет микоризы микроэлементами: цинком, медью, серой.

Таким образом, благодаря неустанной многоплановой работе разнообразных групп микроорганизмов пополняется депо питательных веществ почв.

**Функция стимулятора и ингибитора биохимических и других процессов в почве** определяется различными метаболитами, имеющими растительное или микробное происхождение. Среди них можно назвать ферменты, антибиотики, фитонциды, токсины, витамины, стимуляторы роста растений, оказывающие влияние как на питание растений, так и на межмикробные взаимодействия. Это направление создано Н.А. Красильниковым.

Дискуссии по поводу экологической роли антибиотиков начались задолго до начала широкого использования самого термина. В настоящее время мнение о том, что антибиотики не играют сколько-нибудь существенной роли в природных процессах и в жизнедеятельности их продуцентов, сменяется мнением о том, что антибиотик выступает как способ защиты занятого продуцентом благоприятного пространства, что согласуется с мнением Гаузе о защитной функции антибиотиков.

Одной из причин так называемого “почвоутомления”, или токсикоза почв, является возможность накопления в почвах разнообразных метаболитов почвенных грибов, действующих как токсины. Роль грибов-токсикообразователей подробно проанализирована Н.Г. Мирчинк. Действие токсинов почвенных грибов может проявляться для самых разных организмов: для животных – зоотоксины, для растений – фитотоксины, образующиеся преимущественно грибами; токсины-антибиотики, действующие как на макро-, так и на микроорганизмы. Для почвы основное значение имеют токсины сапротрофных грибов. В настоящее время становится очевидным, что именно почва может быть резервуаром ряда микроскопических грибов, являющихся продуцентами микотоксинов, опасных для человека. Предложено использовать метод иницированного микробного сообщества (ИМС), разработанный В.С. Гузевым. Метод дает возможность оценить микробную токсичность почв по отношению к растениям (задержка прорастания семян) и некоторым почвенным животным (степень поедаемости грибов беспозвоночными животными).

Роль ингибиторов биохимических процессов выполняют и различные фитогормоны – физиологически активные вещества, проявляющие свою регуляторную функцию в очень низких концентрациях; к ним относятся абсцизовая кислота и этилен. Этилен при подаче его в атмосферу замкнутой системы оказывал сильное ингибирующее действие как на рост тест-микробов, так и на состояние растений. Экспериментами с чистыми культурами некоторых грибов

и дрожжей показано, что микроскопические эукариоты являются главными продуцентами этилена в почве. Этилен при этом образуется на средах с гуминовыми кислотами и фенолкислотами как единственными источниками углерода.

Сапротрофные почвенные микроорганизмы способны выделять в окружающую среду не только этилен, но и другие газообразные вещества – летучие продукты жизнедеятельности, токсичные для растений и микробов.

Другие типы фитогормонов – ауксины (индолилуксусная кислота) образуются как грибами, так и бактериями. Среди бактерий наиболее активные продуценты ауксинов обнаружены среди азотобактеров и азоспирилл. Ауксины индуцируют в растениях широкий спектр ростовых и формообразовательных процессов.

У некоторых микоризообразующих грибов и корнеподобных бактерий найдены цитокинины – фитогормоны, регулирующие ростовые процессы и задерживающие старение клеток.

Таким образом, микробные метаболиты, накапливающиеся в почвах в значительном количестве, во многом определяют тот тип положительных либо отрицательных взаимодействий, которые складываются между разными группами микроорганизмов либо между растениями и микробами и определяют в конечном счете структуру микробных сообществ. Примеры положительных микробных взаимодействий в природных экосистемах и роли метаболитов в синтрофных взаимодействиях приведены в обзоре Зеновой [2002].

### Информационные функции почв

**Регуляция структуры биоценозов.** Влияние почвы на объем и структуру как растительных, так и микробных сообществ может сказываться по-разному. Во-первых, водно-воздушный, температурный и пищевой режимы почв во многом определяют прорастание семян растений, клеток и спор микроорганизмов, цист амёб, рост корней. Во-вторых, регулирующее действие почвы сказывается опосредованно через влияние почвенных микроорганизмов и их метаболитов на формирование и состояние как фито-, так и микробоценозов. При этом воздействие почвенных факторов удобнее проследить, анализируя консортивную структуру биоценозов, так как детерминант консорции – растение связано трофически и топически с целым комплексом почвообитающих организмов: фито- и зоофагов, микоризных, эпифитных и фитопатогенных грибов, ризосферных симбиотических и ассоциативных бактерий и т.д. О влиянии ризосферной микрофлоры на рост растений мы уже писали ранее. Что касается микоризных грибов, то следует подчеркнуть их особую роль в функционировании лесных биогеоценозов. Микосимбиотрофия влияет на состояние лесов, повышая устойчивость корней к патогенным микроорганизмам и стимулируя рост и развитие сеянцев. В настоящее время описаны типы микориз более чем у 4 тыс. видов высших споровых, голосеменных и цветковых растений, вычислены микосимбиотические параметры важнейших природных биогеоценозов. Установлено, что в лесной и степной зонах, а также большинстве высокогорных фитоценозов микотрофные виды преобладают над немикотрофными. В тундрах и пустынях уменьшается как число микотрофных видов, так и другие микосимбиотические показатели. Как известно, существует прямая коррелятивная связь между ростом и развитием растения и интенсивностью микоризной инфекции; однако само образование микориз во многом определяется количеством питательных веществ в почве, ее водно-воздуш-

ным режимом. Таким образом, почва регулирует и определяет состояние фитоценозов через воздействие почвенных микроорганизмов.

С функцией почвы как регулятора состава и структуры биоценозов тесно связан один из наиболее дискуссионных вопросов почвенной микробиологии – вопрос о всеобщем регуляторе почвенных процессов. Впервые идея о таком едином регуляторе была высказана Я.П. Худяковым. Согласно его гипотезе, периодичность размножения и отмирания микроорганизмов вызывается переменной концентрацией токсического вещества – периодина, образуемого почвенными микроорганизмами и представляющего собой комплекс фенольных соединений. Другие авторы приписали такую общую регуляторную роль этилену. Д.И. Никитин изучил роль микроорганизмов в образовании и удалении этилена и пришел к выводу о том, что этилен не может быть “всеобщим регулятором”, так как он не оказывает какого-либо воздействия на бактерии самых разных видов. С другой стороны, этилен охотно используется бактериями как источник углерода и энергии, а скорость его элиминирования из почвы резко превышает темпы его накопления. Д.Г. Звягинцев также считает, что этилен не может играть существенной роли как регулятор почвенных процессов в масштабах всей массы почвы, исходя из микроразнообразия строения почвы и невозможностью его накопления из-за потребления этого газа многочисленными почвенными микроорганизмами.

Существует точка зрения, согласно которой не сам этилен, а его окись, токсичная для бактерий, может играть регулируемую роль в микробных ассоциациях. В качестве одного из доказательств авторами приводится сопоставление микробостатического воздействия нестерильной почвы и влияния окиси этилена на одни и те же культуры бактерий, имеющие сходный характер.

Вряд ли существует единый регулятор микробиологических и биохимических процессов в почве. Подтверждением почвенный фунгистазис–задержка прорастания спор грибов, когда, вопреки первоначальной точке зрения о наличии универсального регулятора, обнаруживается все более подтверждений множественной (разнообразной) регуляции.

Ингибирующими и стимулирующими свойствами обладают многие метаболиты. Последнее время все большая роль в регулировании жизни в почве отводится летучим органическим веществам и газам. По мнению Д.Г. Звягинцева, “газообразные вещества являются первыми претендентами на роль переносчиков информации в экосистеме “средовых гормонов”, так как они могут передавать информацию наиболее быстро из-за ускоренной диффузии газов. Однако насыщение всей массы почвы летучими органическими веществами в природных условиях представляется весьма проблематичным”. Химическая природа этих соединений удивительно разнообразна: цианиды, алифатические спирты, альдегиды, эфиры, органические кислоты, терпены и др.

Таким образом, огромный пул почвенных метаболитов микробного происхождения, среди которых значительную долю составляют летучие органические вещества, оказывает, по-видимому, регулирующее влияние на численность и состав микробоценозов, а через них и на состояние фитоценозов.

**Функция сигнала для сезонных и других биологических процессов.** “В условиях холодного и умеренного климата температура почв оказывается важнейшим фактором весеннего включения процессов сезонной активности и вегетации растений”, причем действие температуры сказывается прежде всего на влиянии ее на корни растений, а через них и на развитие надземных органов. Пробуждение роста корней приводит одновременно к активизации микробоценозов в ризоплане и ризосфере растений, снабжающих их необходимыми питательными

ми веществами. Весеннее увеличение численности микроорганизмов в средней полосе связывается с увлажнением и прогреванием верхнего слоя почвы. Осенний максимум численности микроорганизмов в почвах связан с массовым поступлением растительных остатков, опада, накапливающегося в виде подстилки. Весенне-осенние вспышки роста численности микроорганизмов зарегистрированы для всех групп эукариотных и прокариотных микроорганизмов, обитающих в подстилках и почвенных горизонтах. Таким образом, почва посылает сигнал (в виде сильного регуляторного воздействия), вызывающий активизацию микробной жизни и роста растений.

Не менее интересным представляется анализ кратковременных колебаний численности почвенных микроорганизмов. Многие причины таких колебаний были нами рассмотрены ранее: они связаны, по мнению одних исследователей, со всеобщими регуляторами почвенных процессов (периодин, этилен, окись этилена), других – с воздействием разнообразных стимуляторов и ингибиторов роста микробного и растительного происхождения, действующих в разных почвенных микроразнообразиях. Известно, что клетки погибших микроорганизмов фоссилизируются в почве или породе кремнеземом, фосфором, оксидами железа и сульфидами.

В образовании специфических карбонатных пород с выпуклой поверхностью и сложной структурой – строматолитов участвовали цианобактерии в ассоциациях с другими прокариотами. Строматолиты формировались на дне древних водоемов или в болотах с господством цианобактериальных сообществ. Заварзин считает, что именно на примере строматолитовых сообществ становится очевидной целесообразность изучения древних микрофоссилий в составе естественных биогеоценозов. При анализе строматолитов возможно проследить закономерности появления и распространения древних микроорганизмов. Благодаря успехам палеомикробиологии существенно изменились наши представления о нижней границе жизни на Земле: ее следует относить к моменту формирования Земли – 4,6 млрд лет назад.

Участие микроорганизмов в формировании “памяти биогеоценозов” – реликтовых почв четко прослеживается при исследовании вулканических почв. Их важнейшей морфологической особенностью является полигенетичность – наличие реликтовых признаков, погребенных горизонтов, трансформированных современными процессами.

Процесс почвообразования в кальдерах (отрицательных вулканических формах рельефа) шел следующим образом: заселение пеплов вулкана микроорганизмами и растениями, превращение вулканического стекла пеплов под влиянием метаболитов и слизи бактерий в аллофан (вторичный минерал). За короткое время пеплы и шлаки преобразовывались в примитивные почвы, где поселялись лишайники, мхи и высшие растения. Таким образом, роль микроорганизмов в формировании профиля вулканических почв прослеживается более четко по сравнению с другими типами почв.

Почвенная биота сохраняет “память” и о не столь давних событиях. Примером являются последствия антропогенных воздействий на почву. Даже при восстановлении нарушенного растительного покрова комплекс почвенных микроорганизмов еще какое-то время остается прежним. Такая ситуация описана для почвенных грибов при восстановлении рекреационно нарушенных лесных биогеоценозов. При многократном и длительном применении известкования на дерново-подзолистой почве формируется стабильное микробное сообщество, и это сообщество практически не меняется даже при дополнительном внесении извести в почву.

## Целостные функции почв

**Функции защитного и буферного биогеоценотического экрана.** В регулировании жизни БГЦ роль почвы особенно велика, поскольку она относится к природным компонентам с отчетливо выраженными буферными свойствами. Проявлением одного из буферных свойств почв является поддержание микробными сообществами гомеостатического состояния в почве, т.е. определенного, характерного для данного типа почв набора химических и других свойств. При возникновении сдвигов в системе поступления свежих растительных остатков или минеральных удобрений микроорганизмы активно включаются в процесс их трансформации и приводят систему в состояние равновесия. Важно, чтобы каждый небольшой участок почвы содержал весь набор разнообразных микроорганизмов, необходимых для осуществления деструкции поступающих извне веществ; иными словами, почвы должны содержать избыточный запас, или пул, микробов. Концепция микробного пула и пула метаболитов как механизмов, с помощью которых в почве поддерживается гомеостаз, была разработана Звягинцевым. В природных условиях пул микроорганизмов резко увеличивается в экосистемах, где условия для протекания микробиологических процессов оказываются неблагоприятными. С точки зрения функции, в почве следует различать два пула микроорганизмов: пул, имеющий существенное значение для микробиологических процессов, включающий больше 1 млн клеток данного вида бактерий на 1 г почвы; и пул, обеспечивающий выживание определенных видов микробов в почве (последний менее многочисленный, но более разнообразный по видовому составу).

Пул метаболитов, состоящий из запаса гидролитических ферментов и простых органических веществ, создает возможность для существования в почве колоссального пула микроорганизмов. А принцип дублирования, состоящий в том, что каждый существенный физиолого-биохимический процесс в почве строится на функционировании нескольких дублирующих друг друга видов микроорганизмов, в сочетании с огромным запасом микробов в почве позволяет микробному комплексу почв поддерживать состояние гомеостаза в БГЦ.

**Санитарная функция почвы.** Одна из главных санитарных функций почв состоит в деструкции поступающих на поверхность почвы органических остатков. Осуществляется она почвенными микроорганизмами при участии почвенных животных. Изучение роли микроорганизмов в круговороте веществ в природе требует специального анализа и давно выделилось в особое направление почвенной микробиологии.

Особого внимания заслуживает проблема деградации ксенобиотиков, поступающих в последние десятилетия в массовом количестве с промышленными отходами, гербицидов и инсектицидов, пластмассы и нефти, синтетических волокон и пылегазовыбросов. Одним из методических подходов регулирования микробиологических процессов деструкции ксенобиотиков в почве является целенаправленное воздействие на почву с целью создания необходимых условий для интенсификации процесса деградации этих веществ (система агротехнических мероприятий, в результате которых почвенные микробы смогут выполнить свою санитарную функцию). Однако при этом следует учитывать, что в процессе трансформации гербицидов в почве могут образовываться соединения, обладающие большей токсичностью, чем исходные соединения, поэтому важен их мониторинг.

Планируется создать банк микроорганизмов-деструкторов и решить проблемы, связанные с интродукцией микроорганизмов в почвенные системы. Еще

более сложной задачей является модификация биохимических свойств почв путем введения соответствующей генетической информации в ассоциацию почвенных микроорганизмов.

Третий, не менее важный аспект санитарной функции почв связан с ее антисептическими свойствами, лимитирующими развитие в ней патогенных микроорганизмов. В книге Е.Н. Мишустина с соавт. [1979], посвященной этой проблеме, рассмотрены вопросы, связанные с изменением состава микробоценозов почвы при ее санитарном загрязнении, описаны микробы-индикаторы загрязнения, проанализированы сроки выживаемости в почве патогенных и токсигенных для человека и животных микроорганизмов.

В настоящее время роль почвенных микроорганизмов как “дезинфекторов биосферы” важна также и с точки зрения детоксикации разнообразных загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов и минеральных удобрений. В процессе трансформации и детоксикации этих соединений роль микроорганизмов является многоплановой и основной в биосфере, что показано в ряде обзоров.

**Трансформация почвой вещества и энергии в биогеоценозах** – одна из важнейших функций почв, определяемых главным образом деятельностью обитающих в почве микроорганизмов и почвенных беспозвоночных животных. Круговороты различных веществ: азота, углерода, фосфора, железа, серы и других элементов, осуществляемые микроорганизмами, описаны в многочисленных учебниках по микробиологии.

В 1987 г. в Хабаровске состоялось Всесоюзное совещание, посвященное микробиологической деструкции органических остатков в биогеоценозе. Несмотря на то, что почвенные микробиологи уже на самых ранних этапах развития почвенной микробиологии начали работу в этой области исследований, многие проблемы, связанные с деструкцией органических веществ в биогеоценозах, остаются нерешенными и до сих пор.

## Глава 6

### РОЛЬ МИКРООРГАНИЗМОВ В КРУГОВОРОТЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

#### Микроорганизмы как геохимические агенты

Современное естествознание признает особую роль почвообитающих микроорганизмов в поддержании стабильности наземных экосистем, и биосферы в целом. Впервые на ведущее положение почвенных организмов в биосфере указал В.И. Вернадский, подчеркивавший, что “почвы, переполненные живым веществом, представляют живую пленку суши”.

Столь важное место почвенных организмов в биосфере обусловлено их следующими особенностями:

– по биомассе населяющих ее организмов суша превосходит океан примерно в 750 раз, хотя суша занимает треть поверхности Земли: “сгущение” жизни в почвах на несколько порядков выше, чем в других природных средах;

– 60–90% биомассы Земли представлено микроорганизмами (бактериями, микроскопическими грибами, водорослями и простейшими), населяющими

главным образом почву, причем плотность заселения почв микроорганизмами во многом определяет численность и видовое разнообразие всех других ее обитателей, включая растения и животных;

– микроорганизмы во много раз превосходят растения и животные по своей биогеохимической активности, поскольку имеют значительно более высокое соотношение своей поверхности к объему. В частности, скорость дыхания аэробных бактерий на 1 г биомассы в сотни раз превышает скорость дыхания человека, и слое 0–15 см 1 га плодородной почвы метаболический потенциал микроорганизмов эквивалентен метаболическому потенциалу десятков тысяч человек;

– для микроорганизмов характерна большая лабильность метаболизма, что выражается в использовании ими большого числа разнообразных соединений, недоступных высшим организмам, и в способности ко всем восьми возможным типам питания, тогда как высшие организмы – способны всего к двум;

– “границы жизни” у микроорганизмов значительно шире, нежели у высших организмов – они осуществляют свои функции в широких пределах температуры (от  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), осмотического давления (от бидистиллята до рапы), рН (от 1 до 13), влажности (до величины активности воды  $a_w = 0,67$ ) и пр.;

– еще более важным фактором, влияющим на биогеохимическую роль микроорганизмов, является высокая скорость их размножения при возникновении благоприятных условий и достижение ими предельной численности за относительно короткий промежуток времени;

– численность микроорганизмов в почве, по сравнению с другими природными средами (вода, илы, воздух) выше на несколько порядков – количество бактерий в 1 г почвы достигает нескольких млрд клеток, а общая длина гиф грибов равняется нескольким тысячам метров на 1 г почвы; суммарная биомасса живых микроорганизмов может составлять несколько десятков тонн на 1 гектаре;

– в системе почва–растение именно через микроорганизмы осуществляется круговорот всех зольных элементов и азота, а сама система производит более 90% продуктов питания человека.

### **Особенности жизнедеятельности микроорганизмов в почве**

Почва – уникальная по своим физическим и химическим свойствам полидисперсная гетерогенная многокомпонентная система – представляет собой практически идеальную среду для развития подавляющего большинства микроорганизмов и по микробному генофонду почва – самый богатый природный субстрат; показатель в этой связи, что большинство используемых в промышленности микроорганизмов – продуцентов антибиотиков, аминокислот, витаминов, ферментов и пр., выделено из почв и не случайно биотехнология рассматривает почву как природный банк при поиске культур микроорганизмов с любыми необходимыми свойствами.

Наличие в почве живых растений и животных еще более усложняет гетерогенность ее как среды обитания почвенных микроорганизмов. По современным представлениям, ризосфера растений и кишечный тракт почвенных беспозвоночных животных – своеобразные природные проточные биореакторы с наивысшей активностью микробиологических процессов.

Исключительно высокая концентрация микробной жизни в почве определяет напряженность и разнообразие биогеохимических процессов не только на суше, но и оказывает мощное влияние на формирование и динамику химического состава на гидросферу Земли в целом.

Почвенные микроорганизмы выступают главными природными регуляторами газового состава атмосферы Земли, включая ее макро- и микрокомпоненты (в числе которых важнейшие “парниковые” микрогазы – метан, двуокись углерода и закись азота). В частности, именно поэтому долгосрочный прогноз глобальных изменений климата во многом связан со знанием условий жизнедеятельности микроорганизмов в почве.

Выяснение этих особенностей жизнедеятельности почвенных организмов привело в последнее время к общему выводу, что именно благодаря им почвенный покров выполняет роль глобальной биогеохимической мембраны, через которую происходит обмен веществом и энергией между литосферой, атмосферой, гидросферой и обитающими на Земле организмами.

Возрастающее поступление токсичных соединений (разных органических веществ и элементов из группы тяжелых металлов) в почву создает большие перегрузки для ее самоочищающей способности, тормозит или полностью прекращает деятельность саморегулирующегося гомеостаза, вызывая появление “техногенных” пустынь.

Неучтенная заранее “неблагоприятная реакция” почвенных микроорганизмов является одной из причин неудовлетворительных последствий некоторых мелиоративных мероприятий (“заохривание” дренажа при осушении торфяно-болотных почв, “содовое” засоление при введении в оборот некоторых почв) и рекультивационных работ.

### **Роль почвенных микроорганизмов в круговороте биофильных элементов в природе**

К настоящему времени известно не менее 65 элементов периодической системы, которые подвергаются микробному воздействию, вызывающему, по образному выражению В.И. Вернадского, “вихрь миграции элементов”.

Сравнительно хорошо известна микробиологическая трансформация в почве биофильных элементов (С, Н, О, N, S, Р), входящая в круговорот этих элементов. Высокая скорость круговорота этих элементов в почве – причина и одновременно следствие “сгущения” жизни в наземных экосистемах.

Согласно современным взглядам, такой круговорот возник еще в раннем докембрии, задолго до появления высших организмов (эукариот), и происходил без существенных изменений в течение нескольких млрд лет исключительно за счет деятельности прокариотных организмов (бактерий).

Как известно, вся совокупность организмов на Земле, как прокариот, так и эукариот, по способу питания делится на две резко различающихся группы – автотрофов и гетеротрофов.

Именно автотрофы среди других прокариот играют ведущую роль в круговороте многих элементов в почве. Преимущественно они осуществляют начальные биохимические процессы преобразования горных пород и минералов в ходе первичного почвообразования. Помимо полезной деятельности автотрофных прокариот, в некоторых случаях они могут стать причиной и нежелательных последствий, таких как “занитрачивание” почв, накопление в них токсичного для растений сероводорода (H<sub>2</sub>S), разрушение каменных и бетонных фундаментов, коррозия газо- и нефтепроводов, металлических оболочек кабелей и других инженерных сооружений в толще почвы.

Гетеротрофы, в отличие от автотрофов, нуждаются для своего роста в готовых органических соединениях. При этом микроорганизмы-гетеротрофы, в



отличие от макроорганизмов-гетеротрофов (животных), способны использовать существенно большее число разнообразных органических соединений. Микроорганизмы – гетеротрофы – главные разрушители (минерализаторы) в почве целлюлозы, пектина, лигнина, хитина, газообразных, жидких и твердых углеводов, сложных ароматических веществ, включая почвенный гумус и т.д. Только деятельность почвенных гетеротрофных микроорганизмов замыкает круговорот углерода, азота, водорода, серы и многих других элементов.

Роль микроорганизмов в цикле углерода демонстрирует баланс  $\text{CO}_2$  на Земле, согласно которому  $\text{CO}_2$  атмосферы при полном торможении микробиологической минерализации органических веществ была бы полностью исчерпана в ходе существующего фотосинтеза менее чем за 20 лет.

Океан, растворяя карбонатные ионы ( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) и соединяя их с ионами кальция, способствует осаждению углерода в виде  $\text{CaCO}_3$ , выключая его таким образом из биологического круговорота. Карбонат кальция недоступен в качестве прямого источника углерода для морских фотосинтезирующих организмов и поэтому образование известняков уменьшает запас углерода, доступного для жизни.

Образование каустобиолитов (углей, горючих сланцев, нефти, озокерита и др.), керогена (органических веществ осадочных пород) и гумуса (торфов и почв) – второй путь исключения углерода из малого (биологического) круговорота.

Тем не менее, баланс углекислоты в атмосфере не только поддерживается, но и в последнее время постепенно смещается в сторону увеличения ее содержания, что способствует, в частности, усилению “парникового эффекта” на Земле.

Такой сдвиг динамического равновесия в содержании  $\text{CO}_2$  в атмосфере связывают с увеличением потребления органического топлива (газ, нефть, уголь), деградацией гумуса в результате осушения торфяников, распашки целинных почв, широкомасштабного орошения и как одно из следствий обусловленного комплексом причин процесса аридизации суши.

Среди сложных соединений углерода в природе, которые подвергаются микробиологической минерализации, в почвах в наибольших масштабах представлены (помимо гумуса) углеводы (главным образом целлюлоза), лигнин, а также высокомолекулярные углеводороды и другие полимеры, причем не только природные, но и синтетические (полиэтилен).

В почве много микроорганизмов, утилизирующих простые соединения углерода разного химического строения (метан ( $\text{CH}_4$ ) и другие низкомолекулярные углеводороды ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ), окись углерода ( $\text{CO}$ ), метанол, парафины и др.), на которых макроорганизмы не растут. Все микроорганизмы могут использовать в своем метаболизме диоксид углерода.

В почвах всех типов широко распространены бактерии, образующие метан. В результате их деятельности синтезируется  $5,3 - 10,0 \times 10^8$  т метана в год, что составляет более 65% от общей его продукции. Очевидно, что бактерии-метаногены играют основную роль в образовании метана в природных условиях и составляют важнейшее звено в анаэробном разложении органических веществ и в общем круговороте углерода. Полагают, что сдвиг в динамическом равновесии метана в атмосфере в сторону увеличения обусловлен с расширением площадей орошаемых и затопленных почв – рисовников и водохранилищ, а также ростом поголовья жвачных животных, в рубце которых образуется до 200 л метана в сутки.

Только микроорганизмы способны выделять и использовать молекулярный водород ( $\text{H}_2$ ). Активные продуценты молекулярного водорода анаэробные бак-

терии, осуществляют брожение разнообразных органических соединений. Кроме них,  $H_2$  выделяют бактерии-азотфиксаторы (дiazотрофы), широко распространенные в почвах. Содержание водорода в тропосфере Земли составляет 2,2 млрд т и ежегодно в атмосферу поступает около 33 млн т молекулярного водорода; 10–18% которого образуется микроорганизмами.

Бактерии, окисляющие молекулярный водород (водородные бактерии) в наибольшем количестве, представлены в почвах, причем имеются виды, способные и выделять и потреблять его. Потребление молекулярного водорода микроорганизмами в почвах достигает 120 млн т в год и в значительной степени они поддерживают концентрацию водорода в атмосфере на уровне 0,5–0,6 ppb.

Почвенные микроорганизмы (микроскопические грибы и бактерии) переводят труднорастворимые соединения фосфора (апатит, оксиапатит, фторапатит, вивианит, фосфорит), а также разнообразные органические соединения (фитин, нуклеиновые кислоты, гумусовые вещества), в доступные для высших организмов формы. Растворение неорганических соединений осуществляют многие гетеротрофные бактерии, но наиболее активно этот процесс проводят микоризные грибы.

Круговорот серы в природе осуществляют в основном бактерии. Соединения серы в почвах представлены сульфатами и сульфидами и в небольших концентрациях тиосульфатом, сульфитом, политионатами и органическими формами. Бактерии-автотрофы переводят эти соединения в сероводород в ходе бактериальной сульфатредукции, наиболее активно протекающей при возникновении в почве анаэробных условий. В больших масштабах сульфатредукция идет в рисовниках, в затопленных и болотных почвах. Образующийся сероводород редко выделяется из почв, в основном связываясь ионами металлов в сульфиды, придающие почвенным горизонтам черный цвет. В окислительных условиях (при снижении уровня грунтовых вод, осушении болот, спуске воды с рисовых чеков) сульфиды легко окисляются до сульфатов.

Биогеохимический агент процесса окисления – другая группа автотрофов – тионовые бактерии, окисляющая и другие соединения серы – тиосульфат, тетратионат, молекулярную серу, роданиды. Круговорот серы может замыкаться в почве, не затрагивая другие природные среды – воду и атмосферу.

Для почв характерен круговорот азота, осуществляемый только микроорганизмами. Главные звенья такого круговорота на Земле – азотфиксация, нитрификация и денитрификация, проводятся в основном почвенными бактериями.

Микробиологическая фиксация молекулярного азота играла главную роль в создании азотного статуса биосферы и в поддержании его в течение нескольких млрд лет. Ведущее положение микробной азотфиксации сохраняется и в настоящее время, в естественных экосистемах и в агроэкосистемах, где используются азотные удобрения.

Ежегодный выпуск минеральных азотных удобрений в мире составляет около 70 млн т. На поля вносится также  $\approx 20$  млн т азота в составе органических удобрений. С учетом коэффициента использования азота из этих источников (не более 50% для минеральных и 20% для органических) сельскохозяйственные растения получают примерно 40 млн т азота в год. Ежегодный вынос азота из почвы с продукцией сельского хозяйства по данным ФАО составляет 120 млн т. Сравнение этих величин приводит к выводу о сохранении ведущей роли биологического N в мировом урожае сельскохозяйственных растений, где на его долю приходится около двух третей от общего содержания N.

Увеличение производства и использования минеральных азотных удобрений в растениеводстве породило широкий круг проблем, из которых наиболее сложными признаются две – экономическая (энергетическая) и экологическая.

Первая обусловлена тем, что энергозатраты на производство, транспортировку, хранение и внесение этих удобрений растут значительно быстрее (экспоненциально) по сравнению с увеличением урожаев. Так, повышение урожайности зерновых культур в два раза (с 20 до 40 ц/га) требует увеличения суммы энергозатрат в 10 раз, причем около 45% приходится на синтез и применение азотных удобрений.

Экологическая сторона проблемы высоких доз азотных удобрений обусловлена в первую очередь физиологическими особенностями растений, не способных к единовременному усвоению большого количества азота и запасанию его впрок. Если для некоторых других биофильных элементов (фосфор, углерод) у живой клетки имеются способы резервирования в виде разнообразных запасных питательных веществ, то для азота их нет. Попытки депонировать азот непосредственно в почве (за счет внесения медленнодействующих азотных удобрений) пока безуспешны, а регулировать его содержание в прикорневой зоне путем частых подкормок дорого и сложно.

Вследствие этого, коэффициент использования азота удобрениями растениями остается низким и значительное его количество попадает в водоемы и в атмосферу, вызывая резкое ухудшение (эвтрофикацию) биологического и химического состояния водной среды, усиление “парникового эффекта”, разрушение “озонового экрана” планеты.

В последнее время растет интерес к методам земледелия, где обязательным компонентом является “биологический” азот. Это – единственный экологически чистый путь снабжения растений азотом, при котором принципиально невозможно загрязнение природной среды. Микробиологическая фиксация азота осуществляется за счет энергии Солнца, что уменьшает энергозатраты в земледелии.

Весьма важным для объяснения сохраняющейся ведущей роли азотфиксации в азотном балансе почв явилось обнаружение этой способности у многих бактерий, относящихся к самым разным таксономическим и физиологическим группам.

Напомним в этой связи, что еще недавно способность фиксировать молекулярный азот приписывалась лишь небольшому числу видов высокоспециализированных бактерий, таких как азотобактер, клубеньковые бактерии, клостридии, некоторые бациллы. К настоящему времени азотфиксирующая активность выявлена у представителей практически всех групп бактерий – автотрофных и гетеротрофных, споровых и неспоровых, почкующихся и трихомных, мицелиальных, у эубактерий и архебактерий.

Поскольку наиболее обильно бактерии представлены в почвах, можно сделать принципиальный вывод, что в азотном балансе биосферы ведущая роль принадлежит микробной азотфиксации в наземных экосистемах.

Сейчас установлено, что в почвах зоны умеренного климата при азотфиксации ежегодно связывается не 3–5 кг азота на гектар, как считалось недавно, а 30–50 кг. В тропической зоне ее продуктивность достигает 100 кг азота на гектар.

Стали понятны источники азота, поддерживающие азотный баланс так называемых климаксных экосистем (тайга, тундра, луговая степь и пр.), биологическая продуктивность которых остается неизменной в течение длительного времени, но сопровождается постоянными потерями азота в ходе его микробиологической трансформации.

Применение новых методов привело к существенному расширению знаний и по экологии азотфиксации. Одним из важнейших достижений явилось обнаружение у всех без исключения растений способности активизировать процесс азотфиксации у ассоциированных с ними (на корнях – в ризосфере и на стеблях – в филлосфере) бактерий. Оказалось, что тесное взаимодействие растений и азотфиксирующих микроорганизмов, ранее хорошо известное только для бобовых растений и клубеньковых бактерий, характерно для всех растений во всех биоклиматических зонах Земли и обеспечивает не только их автономность в отношении азотного питания, но и является основным механизмом поддержания азотного баланса биосферы Земли.

Эти данные объяснили сохранение на одном уровне азотного баланса почв и урожая растений в длительных (90–150 лет) опытах по возделыванию небобовых растений без применения азотных удобрений (“Брэдбокский опыт” в Англии, поля Прянишникова в России, опыт “вечная рожь” в Германии и др.). Бессменное культивирование озимой пшеницы, ячменя, ржи, риса и др. на одном и том же участке не приводило к заметному снижению их урожая и содержания азота в почве несмотря на ежегодное отчуждение его урожаем. В вариантах этих же опытов без растений (“вечный пар”) содержания азота в почве вполне объяснимо непрерывно падало.

Нитрификация и денитрификация – два других важнейших звена в круговороте азота в почвах, которые осуществляются только микроорганизмами. Общее свойство разнообразных бактерий и грибов, проводящих эти процессы – образование в качестве одного из конечных продуктов газообразного соединения – закиси азота. Закись азота – один из важнейших микрогазов атмосферы Земли, ответственный за формирование “парникового эффекта” и разрушение озонового “экрана” планеты. Закись азота обладает значительно большей (примерно в 150 раз, чем диоксид углерода и в 40 раз, чем метан) экранирующей способностью, а также превосходит их по длительности пребывания в атмосфере (около 130 лет).

В настоящее время общее содержание закиси азота в атмосфере оценивается в 1500 Tt N-NO<sub>3</sub> (1Tt = 10<sup>12</sup> г), а концентрация этого газа составляет 320 ppbv. Ежегодное увеличение количества закиси азота составляет 0,2–0,3%, причем в последние годы темпы этого процесса стали возрастать. В качестве контрольной исходной концентрации используются данные о содержании закиси азота в воздушных пузырьках в ледниках Гренландии и Антарктиды. Согласно оценкам различных авторов, еще 200–300 лет назад она составляла 260–285 ppbv. Таким образом, вполне очевидным является смещение динамического равновесия в содержании закиси азота в атмосфере Земли в сторону ее увеличения.

Основной вклад в этот процесс вносят микроорганизмы, на долю которых приходится до 90% от суммарной эмиссии закиси азота. Образование закиси азота в почве обусловлено способностью всех без исключения организмов окислять и восстанавливать атомы азота в составе разнообразных минеральных и органических соединений. Наиболее известен процесс N-оксигенирования, поскольку он приводит к образованию токсичных, мутагенных и канцерогенных продуктов. Одним из продуктов N-оксигенирования является закись азота.

Высшие организмы – растения и животные, также способны продуцировать закись азота, но только из ограниченного числа промежуточных продуктов N-оксигенирования, таких как гидроксилламин, нитраты и нитриты. Известно лишь несколько примеров образования закиси азота животными и растениями: каталаза печени и некоторые пероксидазы способны продуцировать ее при редукции нитратов в нитрит.

Микроорганизмы – бактерии и микроскопические грибы, наоборот, могут окислять и восстанавливать все соединения азота, а не только гидроксилламин, нитраты и нитриты. При этом образование закиси азота характерно для исключительно широкой по своему составу группе автотрофных и гетеротрофных бактерий, а также для многих микромицетов.

При автотрофной нитрификации, осуществляемой высокоспециализированными бактериями, ионы аммония служат им в качестве энергетического субстрата. Автотрофные нитрификаторы проводят процесс в узких экологических границах – при нейтральной реакции среды, при хорошей аэрации, при отсутствии органических веществ, при невысокой концентрации  $\text{NH}_4^+$ . Таксономически это весьма узкая группа, состоящая всего лишь из 12 видов бактерий. Давно предполагали, что роль автотрофных нитрификаторов в образовании закиси азота в почвах ограничена. Зная особенности этой группы бактерий, трудно объяснить их участие в нитрификации в кислых почвах таежной зоны, в торфяно-болотных почвах, в красноземах тропиков и ряде других почв.

Гетеротрофная нитрификация заключается в соокислении  $\text{NH}_4^+$  и других соединений азота при минерализации органических веществ (аминный азот аминокислот, гидроксилламин, гидроксаматы и другие соединения).

В отличие от автотрофной, гетеротрофную нитрификацию осуществляют разнообразные микроорганизмы – прокариоты и эукариоты. Масштабы образования закиси азота в почвах при автотрофной и гетеротрофной нитрификации пока неизвестны.

Денитрификация – окисление органических соединений бактериями при использовании нитратов и нитритов как их акцепторов электрона – один из наиболее распространенных в почве процессов. Конечными продуктами его являются газообразные соединения – закись азота и молекулярный азот.

Ранее считалось, что денитрификаторы – узкая группа высокоспециализированных бактерий. Сейчас известно, что процесс денитрификации осуществляет широкий круг прокариот.

Прямые методы определения численности бактерий – денитрификаторов подтвердили, что не менее 2/3 бактерий, распространенных в почвах, являются денитрификаторами. Эти данные позволяют полагать, что в почве постоянно и в большом количестве присутствуют денитрификаторы и азотфиксаторы. Эффективность их действия определяется многочисленными взаимодействующими между собой факторами, но наиболее активно их деятельность протекает в ризосфере растений.

Прикорневая зона растений – одна из экологических ниш, где образование  $\text{N}_2\text{O}$  протекают наиболее интенсивно. В ризосфере ячменя потери нитратного азота в виде  $\text{N}_2\text{O}$  достигают 90%, тогда как в парующей почве они составляют 5%. В ризосфере растений риса образование закиси азота протекало в 14 раз интенсивнее, чем в почве без растений.

$\text{N}_2\text{O}$  в природе постоянно поглощается. Известно несколько процессов восстановления закиси азота до молекулярного азота – химические реакции в стратосфере (“стратосферный сток”) и микробиологическая трансформация в почве (“тропосферный сток”).

Химические реакции  $\text{N}_2\text{O}$  с стратосферным озоном ( $\text{O}_3$ ) приводят к разрушению озонового “экрана” Земли. Однако поглощение закиси азота в стратосфере идет очень медленно.

Поэтому основным стоком для  $\text{N}_2\text{O}$ , что признается всеми исследователями, является почва. Известно несколько микробиологических процессов, в ходе ко-

торых восстанавливается закись азота; среди них наибольшее значение имеют два – денитрификация и азотфиксация.

В неполной цепи нитратного дыхания денитрификация заканчивается образованием  $N_2O$ . Полная цепь, когда  $N_2O$  восстанавливается до молекулярного азота (процесс денитрификации идет до конца), обнаружена у ограниченного числа микроорганизмов, “истинных” денитрификаторов. Один и тот же микроорганизм в разных условиях может осуществлять полный или укороченный цикл нитратного дыхания.

Денитрификация с образованием  $N_2O$  осуществляется в условиях более маргинальных относительно полной цепи, образование молекулярного азота – при более низкой температуре и рН, в присутствии кислорода. 10% кислорода в почве не ингибирует денитрификацию и высокий ее уровень с образованием  $N_2O$  характерен и для хорошо аэрированных почв.

Нитрогеназа – фермент азотфиксирующих бактерий, восстанавливает  $N_2O$  до молекулярного азота. Но вклад азотфиксации в сток закиси азота в почвах пока не изучен.

Таким образом, основную роль в тропосферном стоке закиси азота играет прокариотное население почв. Между почвами разных типов существуют большие различия по способности служить стоком для закиси азота. Причины таких различий еще не изучены, хотя не приходится сомневаться, что они обусловлены действием каких-то микробиологических (биохимических) механизмов. Исследования последних лет показали большой эффект такого фактора, как засоление почв. Основной микробиологический процесс трансформации  $N_2O$  – денитрификация, имеет в засоленных почвах ряд существенных особенностей, среди которых одно из главных – торможение ее на стадии образования  $N_2O$ . На образцах солончаковых почв Приаралья было показано, что причиной торможения денитрификации на стадии образования  $N_2O$  является повышенная чувствительность к присутствию солей редуктазы  $N_2O$  – фермента, ответственного за восстановление  $N_2O$ . Доказательства такого механизма образования  $N_2O$  были получены при искусственным засолении незасоленных почв (черноземы, каштановые и серые лесные) – во всех испытанных почвах соли (сульфаты, хлориды) приводили к преобладанию  $N_2O$  в конечных продуктах денитрификации.

Эти данные указывают на особую (возможно, ведущую) роль засоленных почв в образовании  $N_2O$  в глобальных масштабах. Как известно, более 35% земель мира подвержены опустыниванию и засолению. Причиной быстрого увеличения ареала засоленных почв называют комплекс факторов, обусловленных глобальным изменением климата планеты и неумелой хозяйственной деятельностью человека, приводящей к вторичному засолению. Возможно, торможение денитрификации в почвах засоленного ряда на стадии образования  $N_2O$  с учетом быстрого увеличения их площади – одна из причин наблюдаемого увеличения концентрации  $N_2O$  в атмосфере.

### **Роль микроорганизмов в трансформации других химических элементов**

Как уже отмечалось, из 103 элементов не менее 65 подвергаются микробиологической трансформации. Выделены микроорганизмы, осуществляющие эти превращения. Ведутся поиски новых микроорганизмов, способных к биогенной трансформации других элементов. Если из оставшихся 38 элементов отбросить 6 инертных газов и 15 искусственно полученных элементов, не встречающихся на Земле, остается 17 элементов, микробиологическая трансформация которых

теоретически возможна. Среди них восемь малоизученных лантанидов, а также Hf, Ta, W, Pt, Pl, Tl, As, Pa. Считается, что такие микроорганизмы в природе есть. Известна присущая всем организмам способность к биогенной трансформации так называемых микроэлементов – Mo, Zn, Co, Fe, Cu, B и др.

В литературе накоплен обширный экспериментальный материал о микробиологической трансформации в природных средах многих других элементов, которые не используются в метаболизме живой клетки. В их числе Hg, Cd, Cr, V, Mn, Bi, Al, Ag, Au, Li, U и др. Подробно изучены микробиологические превращения As, Se, Sb и других элементов.

Микроорганизмы, участвующие в этих процессах, все шире используются в биогеотехнологии при выщелачивании и осаждении из природных субстратов разных элементов.

Hg в почвах микробиологически трансформируются с образованием метилированных (алкилированных) производных – метил и диметилртути. Помимо металлической Hg алкилртуть продуцируется микроорганизмами и из ряда других соединений –  $HgCl_2$ ,  $HgS_2$ ,  $HgNO_3$ ,  $Hg(CN)_2$ ,  $HgO$ ,  $Hg(SCN)_2$ ,  $Hg(CH_2COOH)$ . Способностью к метилированию обладают практически все микроорганизмы – бактерии и грибы и, следовательно, процесс может протекать в любых почвах при попадании в них ртути или ее производных. Наиболее активен он в аэробных условиях, при нейтральной реакции среды и повышенной температуре.

Метилртуть – значительно более токсичное и одновременно более летучее соединение, чем другие формы ртути. С позиции биологической целесообразности кажется невероятным, что в присутствии ртути микроорганизмы могут продуцировать еще более токсичное ее производное. Экспериментально подтверждено, что метилртуть для образующих ее организмов более токсична, чем неорганическая ртуть. Объяснение этому феномену находят в повышенной летучести метилированных соединений ртути и с точки зрения биологической целесообразности продуцирование метилртути можно оценить как способ нейтрализации токсических солей ртути для микроорганизмов, которая удаляется из места ее образования.

As, как и Hg, также подвергается метилированию почвенными микроорганизмами. Однако соединения Hg, в отличие от мышьякорганических соединений (метил- и диметиларсин, метиларсиновая и диметиларсиновая кислоты), в 25 раз менее токсичны, чем трехвалентный мышьяк и поэтому метилирование мышьяка – биологическое приспособление для детоксикации этого элемента. Метилируют мышьяк, в основном, почвенные микроскопические грибы, у бактерий подчиненная роль. Процесс активен в аэробных условиях в нейтральных средах.

Почвенные микроорганизмы продуцируют также летучие метилированные соединения Se (диметилселенид), Te (диметилтеллурид), Pb (тетраметилсвинец), Sn (ди-, триметилолово), Pd (метил- и диметилпалладий), Au (диметилзолото). Исходя из химических свойств Pt и Tl принципиально возможно их метилирование.

Содержащий Zn сульфидный минерал сфалерит ( $ZnS$ ) легко окисляется автотрофными бактериями при возникновении окислительных условий: при этом Zn переходит в раствор и может мигрировать в почве. В восстановительных условиях микроорганизмы вновь образуют сульфид цинка (вторичный), осуществляя таким образом круговорот этого элемента в почве.

Cu присутствует в природе в составе многих минералов, основным из которых является халькопирит. При его окислении микроорганизмами образуется обширный ряд вторичных медных минералов – англерит ( $CuSO_4 \times 2Cu(OH)_2$ ),

малахит ( $\text{CuCO}_3 \times \text{Cu(OH)}_2$ ), азурит ( $2\text{CuCO}_3 \times \text{Cu(OH)}_2$ ), хризоколла ( $\text{CuSiO}_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ), дигенит ( $\text{Cu}_9\text{S}_5$ ), ковеллин ( $\text{CuS}$ ).

V встречается в ряде минералов – монтрозеите, минас-рагрите и др. При микробиологическом окислении возникают новые минералы, в которых V присутствует уже в пятивалентной форме – корвусит или меланованадий.

U в почве также может окисляться микроорганизмами, переходя из четырехвалентного состояния в шестивалентное.

Sb присутствует в природе в трехвалентной форме в виде минерала антимонита –  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ . Автотрофные бактерии-эробы легко окисляют Sb до пятивалентного состояния ( $\text{SbO}_3$ ); при смене условий протекает восстановление ее вновь до сульфида бактериями – сульфатредукторами.

Молибден в горных породах и рудах представлен главным образом минералом молибденитом ( $\text{MoS}_2$ ), который микробиологически превращается в повеллит ( $\text{CaMoO}_4$ ) и ферримолибдиты, переходя при этом из четырехвалентной формы в более подвижную шестивалентную.

При разрушении сульфидных минералов под действием бактерий в растворимое состояние переходят и многие редкие элементы, которые из-за близости их свойств со свойствами Cu, Pb, Zn, входят в кристаллическую решетку минералов, изоморфно замещая эти металлы. В частности, экспериментально показано микробиологическое окисление таких элементов, как Cd, Tl, Ga, In, Ge, Re. Cr может микробиологически восстанавливаться из шестивалентного (весьма токсичного и относительно хорошо растворимого) состояния до трехвалентного (менее подвижного). При этом минерал крокоит ( $\text{PbCrO}_4$ ) превращается в хромит ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

Au также подвергается микробиологическому восстановлению, в результате которого резко усиливается его растворимость и возрастает миграция. Микроорганизмы могут накапливать Au в своей биомассе, способствуя концентрированию.

В наибольших масштабах в почвах микробиологически трансформируются соединения Fe. Fe, как и Mn, – важнейший элемент в почве. Оба – элементы с переменной валентностью, что во многом определяет их огромную роль в биогеохимических превращениях в почве. В зависимости от условий, Fe в почве находится в окисной или закисной (восстановленной) форме.

Основные минералы, в которых железо представлено в почве в окисной форме, – гетит ( $\text{Fe(OH)O}$ ), ферригидрит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ ), гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), магнетит ( $\text{FeCO}_3$ ).

Восстановление соединений Fe и Mn гетеротрофными микроорганизмами широко распространено в природе. Но наиболее характерен этот процесс для почв, в которых при смене окислительных условий на восстановительные протекает глееобразование, придающее почвенным горизонтам характерный голубовато-зеленый цвет.

В закисной (восстановленной) форме Fe присутствует в почве в составе сидерита ( $\text{FeCO}_3$ ), сульфидов ( $\text{FeS}_2$ ,  $\text{FeS}$ ), силикатов ( $\text{FeO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ ). Восстановленные формы Fe сравнительно хорошо растворимы. В окислительной среде они подвергаются химическому и микробиологическому окислению с образованием нерастворимых окисных соединений.

Восстанавливать Fe способны разные микроорганизмы, причем не только анаэробные, но и факультативно-анаэробные и аэробные. Осуществляемое постоянно в почве восстановление Fe важно для всех организмов, поскольку именно двухвалентное железо входит в состав многих металлоферментов (цитохромов, каталазы и др.), ответственных за главные биохимические функции живой клетки.



Известно большое число микроорганизмов, осаждающих окислы Fe и Mn на поверхности своих клеток или непосредственно в среде – так называемые железобактерии. Они могут проводить этот процесс как при высокой кислотности среды, так и в нейтральных и даже щелочных условиях.

Комплексные соединения с гумусовыми веществами Fe (гуматы и фульваты Fe) и с разнообразными неспецифическими органическими соединениями (аминокислоты, амины, органические кислоты и пр.) обладают повышенной растворимостью и ускоряют миграцию Fe и Mn. При разрушении микроорганизмами – гетеротрофами органической части таких комплексов Fe и Mn откладываются в профиле почвы.

Микробиологическое разрушение природных соединений алюминия осуществляют многие гетеротрофные и автотрофные бактерии. С их участием протекает разрушение разнообразных глин, таких как каолинит, галлуазит, иллит, монтмориллонит, вермикулит, серпентинит, хризолит и др.

Устойчивость различных глин к биодеградации варьирует. В целом, диоктаэдрические глинистые минералы (каолинит, галлуазит, иллит, монтмориллонит и др.) более устойчивы, чем триоктаэдрические глинистые минералы (вермикулит, серпентинит, хризолит и др.). Промежуточное положение между указанными группами глинистых минералов занимают хлориты.

Si силикатов и алюмосиликатов также подвергается воздействию микробов, причем их неустойчивость возрастает по мере снижения количества силоксановых (Si–O–Si) связей.

### **Микробиологическое разрушение горных пород и минералов**

Исследования В.И. Вернадского, Б.Б. Полынова и их последователей убедительно показали роль биологических факторов в протекающем на поверхности земной коры процессе выветривания горных пород. Как известно, интенсивность выщелачивания химических элементов из горных пород и минералов неравномерна и зависит от свойств элементов.

Согласно накопленным к настоящему времени данным, биологические процессы по масштабности и глубине осуществляемых реакций занимают ведущее положение в процессах выветривания – превращениях элементов в земной коре, в разрушении первичных минералов и горных пород. Многочисленные исследования в самых разных регионах Земли показали, что в естественных условиях все горные породы и минералы (причем не только на поверхности Земли, но и на значительной – до нескольких километров, глубине, в подповерхностных слоях) населены разнообразными микроорганизмами, которые при возникновении благоприятных условий разрушают их с выщелачиванием отдельных элементов.

Разрушение горных пород и минералов может идти под влиянием как прямого, так и косвенного воздействия микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности. Известно несколько механизмов такого воздействия – непосредственное окисление переменного-валентных элементов, действие биогенных кислот и щелочей, хелатообразование и биосорбция.

Переменно-валентные элементы, которые находятся в минералах и горных породах в восстановленном состоянии, способны служить источником энергии для автотрофных бактерий, переходя в окисленную форму. Среди различных групп минералов эти бактерии наиболее легко окисляют сульфиды (антимонит, галенит, висмутин, сфалерит и многие другие минералы). В результате окислительной деятельности бактерий двухвалентная сера сульфидов переходит в ше-

стивалентную форму сульфатов, из которых затем возникают разнообразные вторичные сульфатные минералы – гипс, алунит, ярозит и др., характерные для многих почв.

Кроме серы, источником энергии для автотрофных бактерий служит Fe, Mn, Sb, Cu, Mo, U и некоторые другие элементы. В процессе биологического выветривания содержащие эти элементы минералы разрушаются, превращаясь в иные минералы, присутствующие в почве.

Кислотность (щелочность), определяется органическими и минеральными кислотами и щелочами биологического происхождения и также является одним из ведущих факторов преобразования минералов и первичного почвообразования. Способностью к продуцированию кислот и щелочей обладают все микроорганизмы, но наиболее активны автотрофные бактерии и микроскопические грибы. Автотрофные бактерии – нитрификаторы образуют азотную и азотистую, серные бактерии – серную и сернистую кислоты.

Многие бактерии выделяют сероводород, а микроорганизмы – аммонификаторы образуют аммиак, которые выступают в роли активных геохимических агентов. Микроскопические грибы продуцируют органические кислоты: уксусную, щавелевую, янтарную, лимонную и пр., под действием которых разрушаются горные породы и минералы. Микроскопические грибы – один из основных компонентов лишайников-пионеров при заселении горных пород.

Важно в биологическом выветривании хелатообразование.Metalлоорганические комплексы образуются и действуют одновременно с биогенными кислотами, щелочами и другими микробными метаболитами. Считается, что хелатообразование является основным механизмом деградации горных пород и минералов при развитии гетеротрофных микроорганизмов.

Биосорбция – еще один путь воздействия микроорганизмов на химические элементы в природных средах, что указывал еще В.И. Вернадский. Многие бактерии и микроскопические грибы накапливают различные элементы в своей биомассе, концентрируют эти элементы в местах массового развития или скопления этих организмов. В основе биосорбции лежит взаимодействие химических элементов с поверхностными структурами клеток микроорганизмов, микробными метаболитами. Биосорбция некоторых металлов (Au, U, Cu, Cd) микроорганизмами применяется в современной биогеотехнологии.

Установлено активное участие микроорганизмов в деградации (выветривании) минералов всех основных групп – силикатов и алюмосиликатов, сульфидов и их аналогов, арсенатов и их аналогов, оксидов и гидроксидов.

Микроорганизмы осуществляют биодеградацию алюмосиликатов: андалузита, берилла, жадеита, каолинита, кианита, лейцита, микроклина, мусковита, нефелина, ортоклаза, петалита, сподумена. Основные агенты биодеградации – гетеротрофы – микроскопические грибы и бактерии, ответственные за ацидолиз, алкалолиз и комплексолиз, происходящие при взаимодействии комплексов, с кристаллической решеткой минерала.

Разные микроорганизмы, относящиеся к различным систематическим группам, участвуют также в деградации основных алюмосиликатов, способствуя выносу катионов металлов и разрушению силоксанной и алюмокислородной связи, лежащих в основе их кристаллической структуры. При этом один из главных механизмов действия микроорганизмов – окисление ими элементов с переменной валентностью, входящих в состав силикатных горных пород и минералов.

Окисление или восстановление элементов с переменной валентностью могут осуществляться как автотрофными, так и гетеротрофными микроорга-

низмами. В последнем случае эти элементы либо играют роль акцепторов электрона, либо окисляются под действием продуктов метаболизма микроорганизмов.

Окисление сульфидных минералов – один из наиболее хорошо изученных примеров микробиологической деградации минералов в природе. Бактерии окисляют – пирит и марказит ( $\text{FeS}_2$ ), пирротин ( $\text{FeS}$ ), халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ), борнит ( $\text{CuFeS}_4$ ), ковеллин ( $\text{CuS}$ ), халькозин ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), тетраэдрит ( $\text{Cu}_8\text{Sb}_2\text{S}_7$ ), энаргит ( $\text{Cu}_2\text{SAs}_2\text{S}_5$ ), арсенопирит ( $\text{FeAsS}$ ), реальгар ( $\text{AsS}$ ), аурипигмент ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), кобальтин ( $\text{CoAsS}$ ), пентландит ( $\text{FeNi}_9\text{S}_8$ ), виоларит ( $\text{Ni}_2\text{FeS}_4$ ), бравоит ( $\text{NiFeS}_2$ ), миллерит ( $\text{NiS}$ ), полидимит ( $\text{Ni}_3\text{S}_4$ ), антимонит ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ), молибденит ( $\text{MoS}_2$ ), сфалерит ( $\text{ZnS}$ ), марматит ( $\text{ZnS}$ ), галенит ( $\text{PbS}$ ), геокронит ( $\text{Pb}_5\text{SbAsS}_8$ ), а также сульфид галлия ( $\text{Ga}_2\text{S}_3$ ) и селенид меди ( $\text{CuSe}$ ).

Среди несulfидных минералов, подвергающихся микробиологической трансформации, в почве широко представлены соединения Mn и Fe. Известно более чем 100 марганецсодержащих минералов – оксидов, карбонатов и силикатов. Важнейшими окислами являются псиломелан, бирнесит, пиролюзит, манганит, торокит, гаусманит, браунит. Из карбонатов – родохрозит, из силикатов – родонит. Как правило, все эти минералы являются вторичными, возникшими в результате микробиологического изменения первичных минералов вулканического происхождения.

### Заключение

В настоящее время ясна ведущая роль почвенных микроорганизмов в биогеохимических превращениях веществ и биологическом круговороте химических элементов в наземных экосистемах. Деятельность человека усиливает их биогеохимическую функцию, сдвигая существовавший в природе гомеостаз, причем такой сдвиг – причина серьезных изменений в масштабах всей планеты.

Эти изменения, с учетом большой инерционности микробиологических процессов в природе, вызывают обеспокоенность не только специалистов, но и политиков (Рио-де Жанейро-1992, Нью-Йорк-1997). Необходимость регулировать активность микроорганизмов в почве понятна.

Современная микробиология сформулировала конкретную задачу – управление микробиологическими процессами непосредственно в природной среде.

Усиление микробиологической активности в почве давно используется человеком в сельском хозяйстве: большинство агротехнических приемов (вспашка, внесение органических удобрений и пр.), направлено на повышение скорости биологического круговорота химических элементов и увеличение их доступности сельскохозяйственным растениям. Осушение торфяников, компостирование, силосование кормов и пр. также способствуют ускорению микробиологического использования химических элементов.

Ускоренная микробиологическая трансформация разнообразных веществ в очистных сооружениях за счет активизации естественных популяций микроорганизмов – еще одно использование активности микроорганизмов.

Такие же примеры усиления деятельности природных популяций микроорганизмов известны и в геологической микробиологии – при выщелачивании металлов, при активизации микробиологической деятельности в нефтяных пластах с целью увеличения их нефтеотдачи и пр.

Подавление микробиологических процессов в почве – более сложная задача и решена она пока только для ограниченного круга микроорганизмов; деятельность высокоспециализированной группы автотрофных нитрификаторов может быть подавлена внесением химических веществ – ингибиторов нитрификации. Известны примеры торможения деятельности природных популяций микроорганизмов в локальных масштабах путем снижения влажности (сушка кормов и сельскохозяйственного сырья), понижения температуры (в хранилищах), использования разнообразных консервантов и антисептиков.

## *Глава 7*

### **МИКРОСТРУКТУРНЫЙ УРОВЕНЬ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЧВ И ПОЧВЕННАЯ НАНОФАУНА**

#### **Введение**

Почвенные микроорганизмы и почвенная нанофауна принадлежат к тем организмам, чья роль в наземных экосистемах чрезвычайно велика, но сами они непосредственно могут наблюдаться только с помощью инструментальных методов. Практически всегда за рамками экологических исследований остаются важнейшие особенности функционирования, детали организации их сообществ – этих наиболее активных и значимых по масштабу оказываемого воздействия на биосферу групп почвенного населения. Где, как и в каких размерных масштабах происходит переход от индивидуального организма к популяции, сообществу и биоценозу? Почему характеристики разных групп почвенного населения, исследованных в конкретных местообитаниях, нередко так успешно могут быть экстраполированы на более крупный размерный уровень организации природных систем – биогеоценоз или экосистему? Где те первичные зоны контакта живого вещества и минеральной части почв, в которых и происходит формирование тех специфичных почвенных свойств, оказывающих в каждом случае неповторимое воздействие на экосистему? Неоспоримой на сегодняшний день считается средообразующая роль почвенной микробиоты, ее влияние на pH, окислительно-восстановительный потенциал, структуру почвы. По-видимому, каждый размерный уровень почвенной биоты и/или их совокупность со своими трофическими особенностями, способами питания и передвижения, в частности своей локомоторной деятельностью, ответственен, хотя бы частично, за формирование определенных структурных элементов почвы, например, копрогенные агрегаты, а иногда и целых горизонтов (копрогенные горизонты). Общепризнанными являются также процессы биохимического выветривания почвенных минералов, биогенный синтез минералов в почве, в частности биогенного диоксида кремния микроорганизмами, диатомовыми водорослями, раковинными амебами. Несомненно, наибольший интерес представляет раскрытие механизмов биогенного синтеза минералов, но у нас нет полной информации даже об организации сообществ почвенной микробиоты на микроуровне. Настоящая публикация – это попытка хотя бы частично ответить на последний вопрос.

### **Понятие минимального ареала (микроареала) почвенной нанофауны на примере почвенных раковинных амёб (Protozoa: Testacea)**

Проблема размерных характеристик микробиотопа в почвенной зоологии частично затрагивалась в контексте биоиндикации почв – "...обитая в почве, разные размерные группы почвенных беспозвоночных находятся как бы в разных средах, у представителей каждой размерной группы как бы свой особый окружающий мир" [цит. по Гилярову, 1975. С. 8]. Нанофауна (размеры от микрон до долей мм) – простейшие, коловратки, нематоды, тихоходки населяют пленки и скопления влаги на твердых частицах, между частицами и в тонких порах и капиллярах. Микрофауна (доли мм – доли см) – клещи, нематоды, энхитреиды, пауки, ногохвостки, мелкие насекомые – промежутки между частицами почвы и их агрегатами, почвенные трещины, ходы более крупных животных и корней. Мезофауна (доли см и крупнее) – плоские и кольчатые черви, брюхоногие моллюски, мокрицы, многоножки, личинки многих насекомых – всю почву.

На ультрамикроруровне (сканирующая электронная микроскопия) хорошо видно, что почва представляет собой неоднородный субстрат – минеральные частицы, микроагрегаты, глинистая плазма, органическое вещество и т.д. [Добровольский, Шоба, 1978]. Гумус в свою очередь состоит из оструктуренных отдельностей, как волокнистых, так и тонкодисперсных, коллоидальных и бесструктурных [Дюшофур, 1970]. Размер частиц минеральных коллоидов меньше 1–2 мкм. Таким образом, даже тонкодисперсные субстраты для микроорганизмов и нанофауны не являются однородными по своим характеристикам. В то же время повторяемость конкретных дискретных свойств, характеристик, компонентов, структурных элементов почвы задает ей определенный облик, свойственный почве данного таксономического уровня. При ее функционировании формируется сложная динамичная структурная мозаика, в которой набор структурных элементов конечен и характерен для конкретных типов биогеоценозов.

Жизнь нанофауны проходит в почвенных растворах и индикационное значение ее определяется их физико-химическими характеристиками (рН, состав водорастворимых солей, окислительно-восстановительные условия, особенности органического вещества и порового пространства и т.д.). По Орлову [1985] равновесное состояние в системе твердые фазы почвы – почвенный раствор достигается очень редко и в природных условиях оно непрерывно смещается из-за изменений температуры, испарения, взаимодействий почвы с корневыми системами, почвенной биотой, перемещением воды и т.д. Поэтому условия местообитания для микроорганизмов и нанофауны, зависящей во многом от водных условий и газового режима, отличаются большей нестабильностью, чем для почвенной микро- и мезофауны. Возможные важнейшие следствия из этого: 1) среди организмов, относящихся к нанофауне (эумикрофауне), а возможно и для большей части микроорганизмов, доля эврибионтов и космополитов должна быть выше, чем у микро- и мезофауны; 2) почвенные условия могли играть чрезвычайно важную роль в эволюции нанофауны в отличие, например от мезофауны, для которой почва существенно более стабильная среда обитания.

В. Шенборн [1968] ввел понятие минимум-ареала группы для раковинных амёб, как объема или пространства, в котором видовой состав раковинных амёб репрезентативно характеризует состояние таксоценоза. За минимум-ареал был принят суммарный объем проб, в котором число видов было максимально близ-

ким общему числу видов в местообитании. В понятии минимум-ареала группы у Шенборна присутствовал только один показатель – число видов. При этом для определения его размера он использовал зависимость роста числа видов от числа анализируемых проб.

Представление Шенборна о минимум-ареале у простейших, таким образом, идентично понятию минимального ареала, используемого сторонниками флористического подхода в фитоценологии [Миркин, Розенберг, 1978]. В то же время практически всегда важно знать и количественные соотношения видов для понимания структурно-функциональной организации сообщества.

Понятие минимального ареала широко распространено в фитоценологии, но не используется в почвенной зоологии и причина этого, по-видимому, заключается в том, что растения относятся к прикрепленным организмам. Минимальный ареал в фитоценологии обсуждается как часть общеметодических вопросов в рамках планирования геоботанических исследований [Миркин, Розенберг, 1978; Василевич, 1983]. Но проблема этого феномена гораздо шире и это явление отражает целый ряд особенностей экологии видов и их пространственного распространения. В фитоценологии давно и успешно различаются понятия ареала вида, как биогеографического термина и минимального ареала сообщества, как фитоценологического. Для отделения от этих уже занятых понятий и подчеркивания размерных особенностей нанофауны в настоящей статье предлагается ввести термин “микроареал”, используя в качестве примера сообщества раковинных амёб.

Под микроареалом сообщества раковинных амёб будем понимать минимальный объем почвы (пробы), в котором встречаются все виды (или около 80%) раковинных амёб в количественных соотношениях характерных для какого-либо однородного структурного элемента почвы, биогеоценоза или экосистемы. В основе этого явления лежат многие факторы – экологические преферендумы видов, структурная организация почв и экосистем в целом, история заселения, биотические факторы и т.д. С методической точки зрения это понятие полезно при планировании полевого эксперимента, так как оно синонимично понятию минимального репрезентативного объема пробы. Важно также подчеркнуть, что несмотря на то, что за термином “ареал” закрепилось пространственное двумерное (площадное) распределение организмов, для простейших это будет объем или трехмерное пространство. Идеальная почвенная частица с пленкой воды, в которой и обитают почвенные простейшие, трехмерна. Микроареал нанофауны ограничивается, по-видимому, объемом почвы с твердой фазой и поровым пространством в несколько долей или единиц кубических миллиметров (миллилитров).

Среди прямых методов исследования микроареала в первую очередь следует отметить микроморфологию. В микроморфологических исследованиях большое внимание уделяется зоогенным новообразованиям, следам воздействия почвенной фауны на почвенную минеральную массу, процессам деструкции растительного опада и вкладу почвенных животных в структурную организацию почвы [Babel, 1973; Val, 1973]. Размер проб, которые берут в кубические коробки для шлифов при исследовании органического вещества почв, обычно равен 4 × 6 × 8 см [Парфенова, Ярилова, 1977; Babel, 1981]. Но чаще размер шлифов ограничивается размерами 3 × 4, 4 × 6 см [Почвенно-биоценологические исследования в лесных биогеоценозах, 1980]. Бабель [Babel, 1973] отмечал, что число животных и их останков, которые можно обнаружить в тонких срезах почвы, гораздо меньше, чем можно было бы ожидать, и связывал это с легкостью разложения организмов животных. Поэтому точное определение размера

микроареала почвенной эумикро- и микрофауны только микроморфологическими методами, по-видимому, невозможно. Еще один прямой метод – метод почвенных срезов для наблюдений над микроартроподами – глубокое промораживание всей почвенной пробы [Дунгер, 1987]. Его можно использовать для специального исследования характера распределения микроартропод и их экскрементов. Существенным ограничением подобных методов является двухмерность изображений, тогда как реальная картина распределения биоты в почве трехмерна.

Электронно-сканирующая микроскопия позволяет проводить наблюдения непосредственно на разлагающемся опаде и микромонолитах почвы [Бобров, Гельцер, 1982]. В ненарушенных образцах опада и верхней части гумусово-аккумулятивного горизонта можно обнаружить как единичные раковинки, так и скопления тестаций. Этот метод дает дополнительную информацию о размерах микроареала раковинных амёб и пространственной структуре этих организмов в пределах микроареала, а также об особенностях взаимоотношений тестаций с другими организмами.

Размеры микроареала для нанофауны определяются в первую очередь пространственно-временными факторами неоднородности почвы или ее анизотропностью – горизонтальной и вертикальной. Почвенные горизонты представляют собой различающиеся как по экологическим характеристикам, так и степени неоднородности местообитания, в связи с этим размеры микроареала в них должны быть различными.

### Экспериментальное определение минимального ареала раковинных амёб

Для анализа структуры сообществ раковинных амёб были отобраны ненарушенные микромонолиты массой – 5; 3; 1; 0,51; 0,1; 0,05 г из поверхностных горизонтов подзолов сосновых лесов Северной Карелии и Новгородской области [Бобров, 2003].

Список видов, найденных в горизонтах O1, O2, O3, A1A2, A2 подзола железисто-иллювиального (бруснично-вересково-лишайниковый сосняк) и подзола (злаково-брусничный сосняк), насчитывает 36 видов и внутривидовых форм: *Bullinularia indica* (Penard) Deflandre, *Trigonopyxis arcuata* Penard, *T. arcuata* v. *major* Chardez, *T. minuta* Schonborn, *Centropyxis aerophila* Deflandre, *C. aerophila* v. *sphagnicola* Deflandre, *C. cassis* (Wallich), *C. constricta* (Ehrenberg), *C. sylvatica* (Deflandre) Thomas, *Cyclopyxis eurytoma* Deflandre, *Plagiopyxis declivis* Thomas, *Heleopera petricola* v. *amethystea* Penard, *H. sylvatica* Penard, *Nebela bohémica* Taranek, *N. militaris* Penard, *N. parvula* Cash, *N. tinctoria* (Leidy) Awerintzew, *Schoenbornia humicola* (Schönborn) Decloitre, *Phryganella acropodia* (Hertwig et Lesser) Hopkinson, *Valkanovia elegans* (Schönborn), *Assulina muscorum* Greef, *A. seminulum* (Ehrenberg) Leidy, *Euglypha anadonta* Boonet, *E. ciliata* (Ehrenberg) Wailes, *E. ciliata* f. *glabra* Wailes, *E. compressa* f. *glabra* Wailes, *E. laevis* (Ehrenberg) Perty, *E. strigosa* (Ehrenberg), *E. strigosa* f. *glabra* Wailes, *Corythion dubium* Taranek, *C. dubium* v. *orbicularis* Penard, *C. pulchellum* Penard, *Trinema complanatum* Penard, *T. lineare* Penard, *T. lineare* v. *terricola* Decloitre, *Difflogiella oviformis* (Penard) Bonnet.

**Разрез I (P1).** Сообщество раковинных амёб горизонта A1A2 иллювиально-железистого подзола насчитывает 11 видов и 1 вариант (рис. 17). Группа доминантов (> 5%) состоит из четырех видов – *Sch. humicola*, *Ph. acropodia*, *P. declivis*,

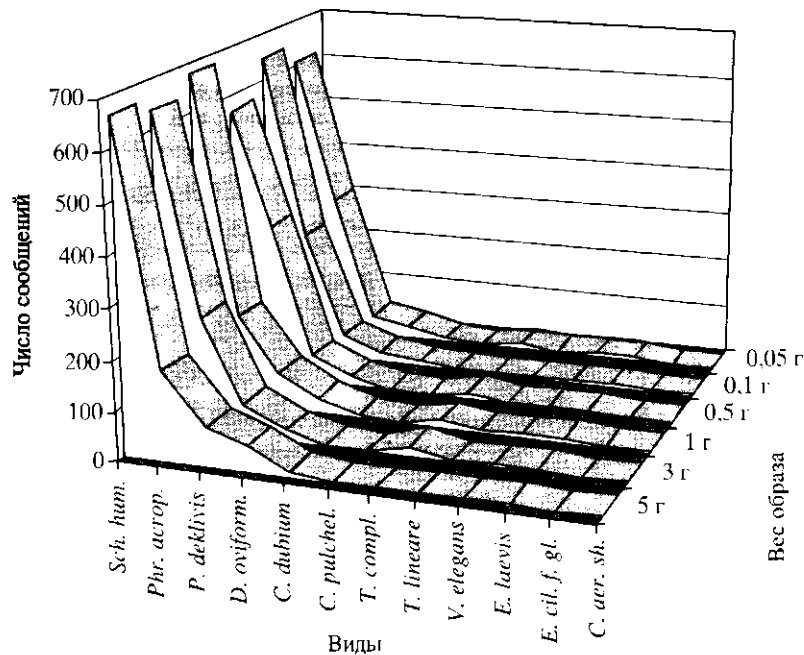


Рис. 17. Структура сообществ раковинных амёб в ненарушенных образцах разного веса (гор. А1А2, подзол, бруснично-вересково-лишайниковый сосняк)

*D. oviformis*. Видовой состав сообщества раковинных амёб типичен для органо-минеральных горизонтов грубогумусных кислых почв хвойных лесов.

Индикаторные виды, характерные для грубогумусных почв автоморфных позиций – *Sch. humicola*, *P. declivis*, *D. oviformis*, *C. dubium*. Число видов в микромонолитах: 5 г (11 видов или 91,7% от всех видов, найденных в горизонте), 3 г (10 или 83,3%), 1 г (10 или 83,3%), 0,5 г (10 или 83,3%), 0,1 г (12 или 100%), 0,05 (10 или 83,3%). Согласно представлениям, разработанным в геоботанике [Миркин, Розенберг, 1978], по которым за площадь выявления или минимальный ареал принимается площадка с числом видов не менее 80% от всех видов в фитоценозе, все пробы удовлетворяют этим условиям. Виды, которые входили в минорную группу и обнаруживались не во всех микромонолитах – *C. pulchellum* и *E. ciliata* f. *glabra*. Мера сходства Мориситы-Хорна сообществ тестаций в образцах разной массы была очень высокой и изменялась в пределах от 0,94 до 0,99 (табл. 16).

**Разрез 2 (P2).** Горизонт О1 (слой хвойного опада) – в состав сообщества входит 28 видов и 8 инфравидовых форм, учтенных во всех микромонолитах (рис. 18). Комплекс доминантов – *C. sylvatica*, *Ph. acropodia*, *T. complanatum*, *T. arcuata*, *N. parvula*, *N. tinctoria*. Индикаторные виды грубогумусных подстилок с моховым ярусом – *T. arcuata*, *N. parvula*, *N. tinctoria*, *C. dubium*, *A. muscorum*, *A. seminulum*. Мера сходства сообщества тестаций в образцах разной массы изменялась в пределах от 0,83 до 0,57 (табл. 17). Самое низкое ее значение отмечено при сравнении сообществ в образцах в 5 и 0,05 г.

**P2.** Горизонт О2 (ферментативный слой органогенного горизонта) – 22 и 4 варианта и формы видов. Доминанты – *Sch. humicola*, *T. complanatum*, *Ph. acropodia*, *T. arcuata*, *P. declivis*. К индикаторным видам добавились *B. indica*. Диапазон изменений меры сходства в микромонолитах – 0,74–0,34 (табл. 17). Мера сходства сообществ в образцах 5 и 0,05 г равна 0,94.



Таблица 16

Мера сходства Морисита-Хорна (количественные данные)  
сообществ раковинных амёб в ненарушенных образцах подзола иллювиально-железистого,  
сосняк бруснично-вересково-лишайниковый

P1, подзол	Сравниваемые навески, г					
	5-3	3-1	1-0,5	0,5-0,1	0,1-0,05	5-0,05
A1A2	0,99	0,98	0,94	0,99	0,96	0,97

Таблица 17

Мера сходства Морисита-Хорна (количественные данные)  
сообществ раковинных амёб в ненарушенных образцах подзола, сосняк злаково-брусничный

P2, подзол	Сравниваемые навески, г				
	5-1	1-0,5	0,5-0,1	0,1-0,05	5-0,05
O1	0,79	0,80	0,83	0,59	0,57
O2	0,66	0,74	0,35	0,34	0,94
A2	0,98	0,97	0,94	0,90	0,94

**P2.** Горизонт A2 (подзолистый горизонт) – 8 видов (рис. 18). Доминантный комплекс состоит из *Sch. humicola*, *Ph. acropodia*, *T. complanatum*, *T. lineare*. Индикаторный вид – *Sch. humicola*. Мера сходства сообществ в образцах разной массы высокая и изменялась в пределах от 0,90 до 0,98 (табл. 17). Изменение структуры доминантного комплекса по горизонтам: P2, L – *Ph. acropodia*, *T. complanatum*, *C. sylvatica*, *T. arcuata*, *N. parvula*, *N. tinctoria*. P2, F – *Ph. acropodia*, *T. complanatum*, *Sch. humicola*, *T. arcuata*, *P. declivis*. P2, A2 – *Ph. acropodia*, *T. complanatum*, *Sch. humicola*, *T. lineare*. Два вида входят в доминантный комплекс сообществ тестаций всех трех горизонтов – *Ph. acropodia*, *T. complanatum*. Остальные виды доминантных комплексов с глубиной заменяются с индикаторных на эвритопные. Так, например, *N. parvula*, *N. tinctoria* подстилки входят в группу сфагново-моховых видов [Chardez, 1965] и относятся к индикаторным видам в ризоподном анализе, используемом в палеоэкологических исследованиях, а *T. lineare* из подзолистого горизонта – типичный эвритоп и космополитный вид.

Число обнаруженных видов в микромонолитах было различным (табл. 18). С уменьшением веса микромонолита процент найденных видов в них чаще всего снижался, особенно это характерно для слоя опада как горизонта с высокой пространственной неоднородностью. Эта невыявляемая группа видов входит в минорный комплекс. Но учтенных видов, входящих в доминантный комплекс, по-видимому, достаточно для того, чтобы проводить сравнительные исследования сообществ тестаций разных местообитаний.

В сериях ненарушенных микромонолитов при уменьшении их массы общая структура сообщества сохраняется, незначительно изменяются соотношения доминантов и могут выпадать некоторые виды из минорной группы (рис. 17, 18). Размер микроареала зависит от неоднородности местообитаний, которые для видов с различными экологическими предпочтениями будет разным и для вы-

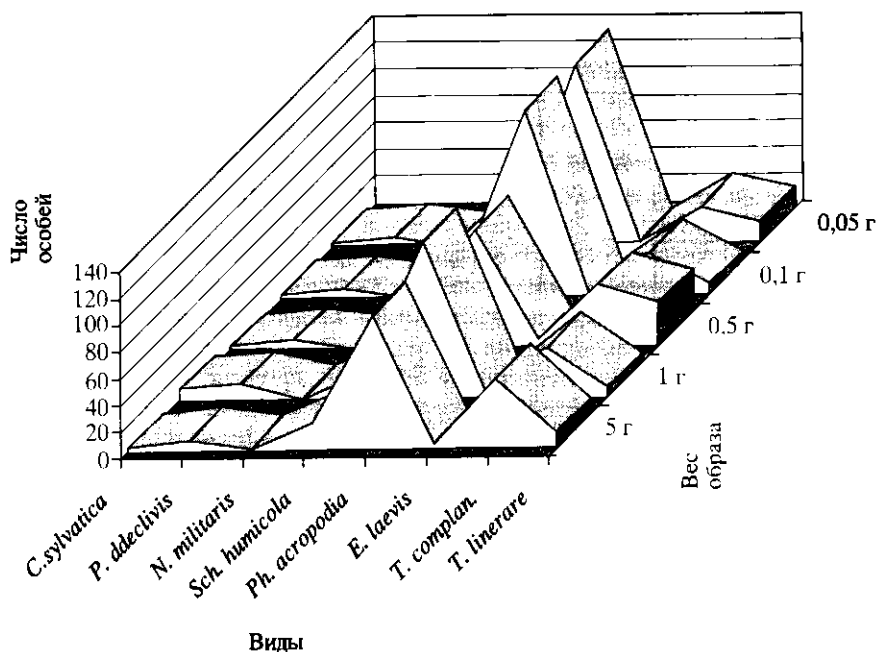


Рис. 18. Структура сообществ раковинных амёб в ненарушенных образцах разного веса (гор. А2, подзол, сосняк злаково-брусничный)

явления полного систематического списка масса образца должна быть не менее 5 г.

Для сравнения сообществ тестаций в пробах разного веса из горизонтов подзола злаково-брусничного сосняка был проведен также кластерный анализ (рис. 19). Сообщества раковинных амёб образовали три группы: 1) группа тестаций в микромонолитах из слоя опада, 2) ферментативного горизонта, 3) подзолистого горизонта. Результаты кластерного анализа показали, что сходство сообществ раковинных амёб в микромонолитах в каждом горизонте независимо от размера образца выше, чем при сравнении состава сообществ раковинных амёб в ненарушенных пробах из разных горизонтов. Данные кластерного анализа подтверждают различия сообществ тестаций в горизонтах почвы, а, следо-

Таблица 18

**Число видов и внутривидовых форм раковинных амёб, в микромонолитах разного веса (подзол, сосняк злаково-брусничный)**

Р2, подзол	Навески, г					n <sup>1</sup>	n <sup>2</sup>
	5 г	1 г	0,5 г	0,1 г	0,05 г		
О1	26/72,2	23/64,0	25/69,4	25/69,4	20/55,6	36	25
О2	23/88,5	17/65,4	17/65,4	19/73,1	22/84,6	26	26
А2	8/100,0	7/87,5	7/87,5	7/87,5	7/87,5	8	14

Примечание. В числителе: число видов; в знаменателе: % от общего числа видов, выявленных в серии микромонолитов; n<sup>1</sup> – суммарное число видов, обнаруженных в микромонолитах; n<sup>2</sup> – число видов, обнаруженных в смешанной пробе.

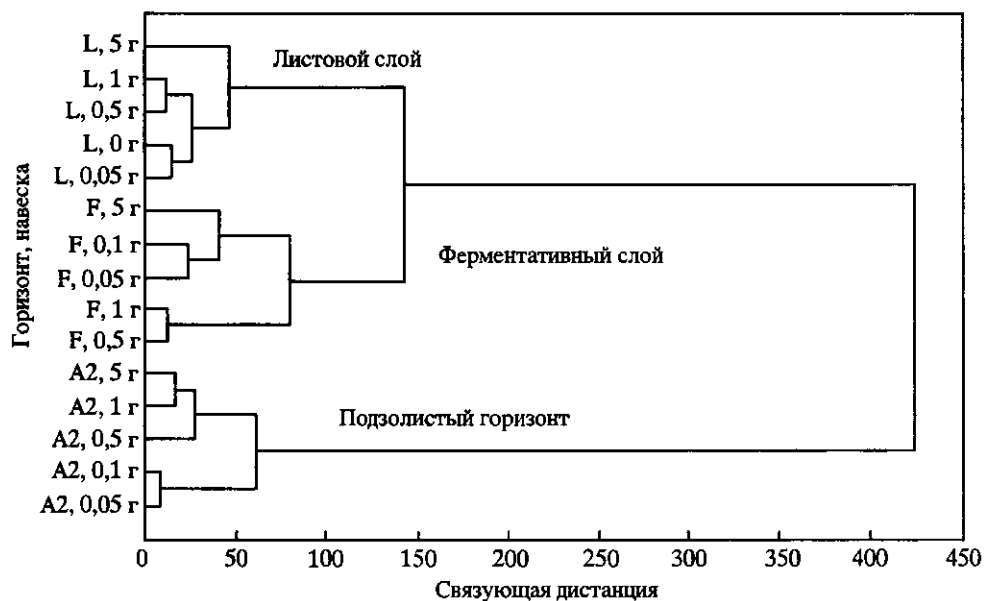


Рис. 19. Сходство сообществ раковинных амёб в пробах разного веса из горизонтов O1, O2, A2 подзола (сосняк злаково-брусничный)

По оси абсцисс – связующая дистанция; по оси ординат – почвенный горизонт и объем пробы

вательно, и существование внутрипрофильных закономерностей вертикального распределения раковинных амёб. Несмотря на сходство доминантных комплексов, в частности *Ph. acropodia* и *T. complanatum* входят в состав доминантных групп всех трех горизонтов, уровень различий между горизонтами достаточно высок.

### Пространственная организация сообществ почвенной нанофауны (методический и методологический аспекты)

Анализ сообщества раковинных амёб с точки зрения их микроареала может дать дополнительную информацию и об их адаптивной стратегии. В почвенной протозоологии принято считать, что ряд морфологических особенностей раковинки (размер раковинки, тип морфологического строения) имеет адаптивное значение [Шенборн, 1971; Корганова, 1977; Schönborn, 1992]. По-видимому, для ряда видов почва представляет собой гетерогенную среду также и на уровне микроареала. Так, например, в горизонтах O и F подзола злаково-брусничного в микронавеске 0,05 г совместно встречаются виды как с шипами, так и без шипов (*Euglypha ciliata* – *E. ciliata* f. *glabra*, *E. strigosa* – *E. strigosa* f. *glabra*), раковинки разного размера (*Trigonopyxis arcula* – *T. arcula* v. *major*), раковинки комплекса близкородственных видов (*Nebela bohémica* – *N. parvula* – *N. tincta*), раковинки, входящие в один видовой комплекс, но имеющие различия в морфологии (*Centropyxis aerophila* – *C. aerophila* v. *sphagnicola*, *Corythion dubium* – *C. dubium* v. *orbicularis*). Еще одним объяснением может быть предположение о перекрытывании экологических ниш видов и их внутривидовых форм, так как все эти виды являются эвритопными. Степень гетерогенности среды влияет также на проявление внутривидовой структуры таксона – политипичность видов существенно

выше в верхних органогенных горизонтах. Слой опада – 28 видов и 8 инфравидовых форм, ферментативный горизонт – 22 и 4, горизонт A1A2 – 11 и 1, подзолистый горизонт – 8 видов. Таким образом, наблюдается снижение доли внутривидовых форм в составе сообществ раковинных амёб от верхних горизонтов к нижним.

Микробиотопы почвенных раковинных амёб характеризуются небольшими размерами, которые в среднем составляют 20–100 мкм [Корганова, 1997], скорости передвижения в среде низкие, например, у *Diffugiella crenulata* до 60 мкм/мин [Schönborn, 1965]. Органогенные горизонты или слои (L, F, H) отличаются высокой гетерогенностью, особенно слой листового или хвойного опада и ферментативный горизонт. Они включают в себя как органические остатки разной степени разложённости, так и минеральные частицы, которые попадают в них в результате турбационной активности почвенной мезофауны и воздушного переноса. Все это приводит к определенной степени сходства сообществ раковинных амёб в микромонolithах разного веса – сходство ниже в органогенных и выше в органоминеральных и минеральных горизонтах (табл. 16, 17). Размер микроареала в последних, по-видимому, существенно меньше, поэтому индексы сходства между сообществами тестаций продолжают оставаться высокими, несмотря на уменьшение размера ненарушенной пробы.

В почвенной зоологии пространственное распределение животных обычно оценивается с точки зрения их взаимного расположения. Известно, что в природе встречаются три типа пространственного распределения организмов – регулярное, случайное и агрегированное. Последний тип распределения является наиболее распространенным. Для малоподвижных организмов [Смуров, 1975] характерно наиболее агрегированное распределение, с увеличением подвижности на фоне общей выровненности условий, например, равномерного распределения гумуса, размещение в почве практически случайно. Следовательно, для организмов, различающихся по способности передвигаться в почвенной толще, размер микроареала будет различным. Микроагрегации в однородных условиях характерны, в частности, для коллембол и основная причина этому особенности их размножения [Чернова, 1988]. Помимо биотических факторов микроагрегации у коллембол важную роль в этом процессе играют внешние условия. Важнейший среди них – фитоценотический (микроруппировки растений, эдификаторное влияние травянистой растительности и древесных растений). Неоднородность среды обитания для организмов, в том числе и для наннофауны, объясняется рядом причин – пространственной неоднородностью самой среды местообитания, зависящей к тому же в значительной степени от размеров самих организмов и существованием пространственных и временных градиентов, а также присутствием в среде других организмов [Бигон и др., 1989]. Очевидно, что понятие микроареала может быть применимо и к микроорганизмам, чья плотность, учтенная прямыми методами, может достигать нескольких млрд клеток на 1 г почвы [Звягинцев, 1987].

Кроме хронологического фактора, обуславливающего неоднородность распределения организмов, важное значение имеет и временной фактор. У раковинных амёб тип распределения очевидно будет меняться в зависимости от этапа сукцессии. В начале сукцессионных стадий – случайный, так как он будет зависеть в основном от динамики заноса организмов. В зрелых почвах регулярный и агрегированный. Регулярный, как следствие постепенного заселения всей почвы и ее регулярных, повторяющихся структурных элементов. Агрегированный, как следствие ограниченной подвижности этих организмов и преимущественно агамного типа размножения. Таким образом, размер микроареала в зна-

чительной степени будет зависеть от типа пространственного распределения почвенных организмов и будет подчинен как характеру пространственной неоднородности почвы, так и временным закономерностям.

Проблема минимального ареала неоднократно обсуждалась в фитоценологии. Под минимальным ареалом понимается размер пробной площадки, на которой встречаются практически все виды сообщества [Миркин и др., 1978, 1989]. Определяют его по кривой “число видов/площадь”, на которой после резкого подъема вверх обычно отмечается точка перегиба. Размеры минимального ареала могут меняться от нескольких квадратных дециметров (синузии лишайников и мхов) до сотен квадратных метров (тропические леса). Другое широко используемое понятие в фитоценологии – площадь выявления [Василевич, 1983], в котором главное не число видов, а их количественное соотношение. Еще в работах Раменского [1925; 1936] были определены с использованием статистических методов размеры пробных площадей для получения среднего обилия вида с заданной точностью, для оценки встречаемости вида и т.д. При этом предполагалось, что все фитоценозы неявно константно однородны [Василевич, 1983]. Но поскольку однородные сообщества встречаются редко, то попытки установления единых площадей выявления проблематичны, особенно, если приходится сталкиваться с экотонными ситуациями. Третье понятие – ценоквант, было предложено Василевичем [1973, цит. по Миркин, Розенберг, 1978] и оно отражает тот размер учетной единицы, когда происходит стабилизация всех видов сообщества. И, наконец, четвертое понятие – площадь опознания, основано на оптимальной площади, на которой может быть дан безошибочный таксономический диагноз фитоценозов [Григорьев и др., 1874, цит. по Миркин, Розенберг, 1978].

В почвенной зоологии по объективным причинам (разноразмерность групп, различная степень подвижности организмов, наличие жизненных циклов и т.д.) проблема минимального ареала как такового не ставилась, но она косвенно обсуждалась при определении числа повторностей для учета нано-, микро- и мезофауны. С определением размера микроареала тесно связана методика отбора почвенных проб. Так при учете мезофауны в зависимости от условий сезона рекомендуется брать пробы с площади от  $1/16 \text{ м}^2$  ( $25 \times 25$ ) до  $1 \text{ м}^2$  [Гиляров, 1987], при учете часто встречающихся клещей или коллембол – 20–25 параллельных проб на одном участке в один срок. В фитонематологии используется традиционный подход для установления численности нематод [Метлицкий, 1985]: отбор образцов по различным схемам с учетом типов пространственного распределения нематод с последующими усреднениями и дроблениями проб (не менее 100 г). Средние пробы используются также и при учете нанофауны, с учетом неравномерности пространственного распределения простейших в почве [Корганова, 1987]. При этом особенности пространственного распределения почвенных животных остаются вне исследования, и при отборе проб используется та или иная схема (метод конверта, метод случайных чисел и т.д.), или отбор образцов производится достаточно произвольно на основе экспертной оценки типа пространственного распределения сообществ почвенных животных (с учетом парцеллярной структуры, микрорельефа и т.д.). Заложенное в методике отбора образцов усреднение проб приводит к упрощенному представлению о структуре сообществ пространственно неоднородных экосистем. При этом желание как можно полнее представить систематический список нанофауны, характерной для конкретного биогеоценоза приводит к обратным результатам. Объем выборки, как правило, не превышает 100–200 экземпляров, а для гумусово-аккумулятивных горизонтов из-за низкой плотности видов он может быть еще

меньше. Смешанная проба из образцов, отобранных в почве под разными парцеллами, позволяет выявить в основном только доминантный комплекс. Редкие виды в большинстве случаев не будут обнаружены, так как виды – доминанты сообществ почвенных тестаций под разными парцеллами, скорее всего, будут различными. В смешанной пробе они будут представлены наиболее полно и в первую очередь именно эти виды войдут в выборку. Вероятность обнаружения редких видов в смешанной пробе снижается, для их выявления необходимо увеличить объем выборки, а это в ряде случаев приводит к существенному возрастанию времени анализа. Например, в слое опада (подзол, сосняк злаково-брусничный) в видовой список тестаций смешанной пробы входит всего 25 видов (табл. 18), тогда как в серии микромолитов общий список возрастает на 30%. В ферментативном горизонте эти списки одинаковы, а в подзолистом списке тестаций наоборот в смешанной пробе увеличивается на 43%. Последняя цифра, по-видимому, является следствием низкого видового богатства раковинных амёб и специфична для подобных ситуаций, поскольку смешанный образец охватывает большую площадь. В ряде случаев смешанная проба все-таки будет использоваться, например, при экспрессной оценке населения малоизученных биотопов.

Вертикальное распределение почвенной нанофауны также имеет свои особенности, обусловленные стратификацией почвенных горизонтов, в первую очередь, подстилок, которые в большинстве случаев дифференцированы на подгоризонты – в самом общем случае L, F, H. Эти слои представляют собой разные сукцессионные стадии деструкции органического вещества, и состав сообщества нанофауны отражает специфику их условий – состояние органического вещества, pH, содержание биофильных элементов и т.д. Например, для микроорганизмов был показан специфичный состав функциональных трофических групп в различных ярусах биогеоценозов, в том числе и в различных горизонтах подстилки и почвенного профиля [Звягинцев и др., 1993]. Игнорирование детальных особенностей стратификации почвенного профиля и работа со средними образцами из почвенных горизонтов, с подстилкой в целом или с шагом в 10–15 см также приводит к искаженным представлениям об организации сообществ почвенной фауны. Даже в упрощенном понимании микроареал остается трехмерным пространством.

Подобная ситуация, если говорить об абиотических причинах пространственного распределения почвенных организмов, есть следствие особенностей соотношения изотропности-анизотропности почвы, которое зависит от масштаба анализа. У анизотропности почвы, как непрерывного природного образования есть свои пределы, иначе было бы невозможно характеризовать свойства (содержание гумуса, pH, содержание биогенных элементов, физических свойств и т.д.) какой-либо таксономической единицы почвы, как невозможна была бы и классификация почв. Горизонтальная, парцеллярная структура биогеоценоза и почвы [Карпачевский, 1981] состоит из конечного набора повторяющихся структурных элементов более или менее изотропных (или константных) по своим свойствам. В качестве примера можно привести структуру почвенного покрова в пределах биогеоценоза или структурную организацию почвенных горизонтов и т.д. В качестве аргумента в пользу таких структур, которые в отношении почвы получили название тессер, Карпачевский [1981] приводит приуроченность к ним определенных микрофлоры и микрофауны. Проблема пространственной неоднородности и обзор дискуссии о тесно связанном с этим вопросом понятии почвенного индивидуума, подробно обсуждались Розановым [1983]. Представляет интерес адаптированный им в отношении почвы подход к классификации

уровней неоднородности горных пород Раца [Рац, 1971, цит. по Розанов, 1983], по которому для пространственной неоднородности почвы выделяется несколько уровней, начиная с молекулярного. В зависимости от масштаба рассмотрения почва может рассматриваться как однородное и как неоднородное тело [Розанов, 1983], оставаясь при этом неоднородным телом. Под однородностью почвы по какому-либо признаку понимается независимость этого признака от пространственных координат.

Каждый структурный элемент почвы, набор которых составляет мозаику пространственной неоднородности, характерную для почвенного покрова конкретного типа биогеоценоза, имеет свои конкретные физико-химические, физические и морфологические характеристики. Эти характеристики наряду с биотическими факторами определяют размер реализованной экологической ниши для конкретного организма или вида. Если допустить некоторую аналогичность между организмом и сообществом, то под микроареалом сообщества можно понимать минимальный объем среды, в пределах которого виды сообщества реализуют все необходимые для их жизнеобеспечения ресурсы. Для разных структурных элементов почвы и конкретных организмов величина микроареала очевидно будет различной. При этом совпадение границ собственно почвенного элементарного ареала или структурной единицы почвы и границ микроареала или минимум-ареала сообщества почвообитающих организмов также проблематично и этот вопрос требует дополнительных исследований. Проблема совпадения или несовпадения границ биогеоценозов, биоценозов и популяций была обсуждена в общих чертах еще тридцать лет назад [Тимофеев-Ресовский и др., 1973], но исследования на эту тему в почвенной зоологии до сих пор немногочисленны, особенно для почвенной нанофауны.

### Роль почвы в эволюции раковинных амёб

Раковинные амёбы населяют различные по степени гетерогенности среды – водные, донные отложения, мхи, почвы (органогенные и органо-минеральные горизонты). Но в разных средах обитания раковинные амёбы используют, по-видимому, одни и те же виды адаптивной стратегии – негенетической (полиморфизм – формы), так и генетической (политипичность – подвиды). Проявление ее у видов, населяющих разные среды, будет различным. Наиболее политипичные виды, такие как *Arcella hemisphaerica* (аквальный вид), включает в себя кроме *typica* 9 вариантов и форм, *A. discoides* (аквально-моховой) – 7, *A. rotundata* – 8, *A. vulgaris* (аквальный) – 10, *Centropyxis aculeata* (аквально-моховой) – 10, *C. ecornis* (аквально-моховой) – 8, *Diffugia acuminata* (аквальный) – 12, *D. oblonga* (аквально-моховой) – 26, *D. lobostoma* (аквальный) – 7, *Cyphoderia ampulla* (аквально-моховой) – 7, *Euglypha acantophora* (аквально-моховой) – 9, *Quadrullella symmetrica* (аквально-сфагново-моховой) – 7, *Lesqueruesia spiralis* (аквально-сфагновый) – 10, входят в аквальный и аквально-моховой комплексы, т.е. населяют более гомогенные среды по сравнению с почвами (подстилки и гумусовые горизонты).

Анализ списка раковинных амёб Шарде [Chardez, 1965] показал, что доля политипичных видов в облигатно аквальной группе составляет 20%, доля политипичных видов в облигатно почвенной группе около 30%. У аквальных видов число вариантов и форм у одного вида высокое и достигает в предельном случае до 26 (*Diffugia oblonga*). В противоположность аквальным видам внутривидовой комплекс у почвенных видов не так широк, это два-три варианта или формы. Этот факт можно рассматривать как свидетельство более широкого таксономи-

ческого континуума у аквальных видов, их значительно большую политипичность по сравнению с почвенными видами из-за большей гомогенности водных местообитаний по сравнению с гетерогенными почвенными условиями, с их более резкими переходами между микроместообитаниями в почвенных горизонтах по сравнению с донными отложениями и водными растениями. Специфика почвенных условий (органоминеральных горизонтов и подстилок) – гетерогенность субстрата, наличие резких физико-химических градиентов должны приводить к быстрому образованию морфологических разрывов, появлению новых форм и закреплению новых признаков в качестве генетически наследуемых. Эта особенность условий обитания, по-видимому, обуславливает существование комплексов близкородственных видов – *Centropyxis aerophila* – *C. sphagnicola* – *C. sylvatica* – *C. cassis* – *C. orbicularis*, *Corythion dubium* – *C. orbicularis*, *Nebela bohemica* – *N. collaris* – *N. parvula* – *N. tincta* – *N. flabellum*. Показательно, что совсем недавно часть этих видов имела статус подвидов.

В. Шенборн [1971] отметил, что среди почвенных видов раковинных амёб разнообразие жизненных форм резко снижается по сравнению с населением водной растительности, мхов и донных отложений. Чем жестче условия, тем меньше разнообразие. Он же впоследствии детально рассмотрел как в природных, так и в лабораторных условиях механизмы адаптивного полиморфизма у некоторых почвообитающих видов раковинных амёб [Schönborn, 1992]. Г.А. Корганова [1977] провела наиболее полный анализ адаптаций у раковинных амёб на основе обширного списка литературы по этой проблеме. Основные адаптационные морфологические особенности – уменьшение размеров, упрощение формы (шаровидность, полусферичность, исчезновение внешних выступов), изменений в расположении, в размере и строении устья.

Вернемся к утверждению о чрезвычайной динамичности состояния в системе твердые фазы почвы – почвенный раствор. Это позволяет определить почву, как существенно более гетерогенную систему обитания нанофауны по сравнению с водными средами. Такая гетерогенность обусловлена широким диапазоном изменений физико-химических характеристик – pH, составом водорастворимых солей, окислительно-восстановительных условий, особенности органического вещества, порового пространства и т.д. Своеобразие почвенных условий дает основание высказать гипотезу о том, что именно эта неоднородность условий стала одной из причин эволюционных изменений нанофауны.

## Глава 8

### СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ СООБЩЕСТВ ПОЧВООБИТАЮЩИХ ЖИВОТНЫХ

#### Введение

Животное население представляет собой облигатный структурно-функциональный компонент почвы. Известно, что практически все природные почвы заселены животными, состав и обилие которых определяется особенностями гидротермического режима, физико-химическими свойствами минеральной массы, составом и структурой растительного покрова и микробного населения. В свою очередь животные влияют на формирование почвенного профиля и ди-



намику гумуса, и их активность в почве в значительной мере определяет пространственную локализацию и темпы деструкционных процессов.

При выветривании горных пород в процессе первичного почвообразования животные формируют пионерные сообщества на поверхности минерального субстрата еще до образования пленочной примитивной почвы, беспозвоночные локализуются вокруг лишайников, на водорослевых колониях и в скоплениях мелкозема. Питаясь живыми и отмершими растительными тканями, животные создают органогенный (копрогенный) слой, в котором почти 90% массы составляют их экскременты. Эта копрогенная масса составляет основу гумусового горизонта, состав и структура которого постепенно усложняется и дифференцируется в ходе растительной сукцессии и накопления мелкозема, растительного опада и отмершей корневой массы, перерабатываемых животными и микроорганизмами. Сукцессия животных при первичном почвообразовании несколько опережает формирование почвенного профиля.

### Общая характеристика животного населения почвы

Впервые факт высокого обилия животных в почве и значение их активности для почвенной динамики было отмечено В.В. Докучаевым [1984, цит по 1951]. В своих работах, посвященных зональности почвенного покрова, он упоминал о наличии постоянной генетической связи между “растительными и животными ассоциациями”. Рассматривая конкретный вклад животных в почвенные процессы, В.В. Докучаев придавал большое значение их роющей деятельности, способствующей перемешиванию почвенных слоев, равномерному распределению гумуса, аэрации почвы, а также трофической активности ускоряющей разложение и минерализацию растительных остатков.

**Размеры.** Основу животного населения почвы составляют мелкие беспозвоночные, невидимые простым глазом. Имеется зависимость между уровнем численности и размерами животных, которая была установлена М.С. Гиляровым [1949]. Размеры почвообитающих беспозвоночных различаются на пять порядков (от нескольких микрон до десятков сантиметров), а уровни их численности варьируют от десятков до сотен тысяч особей в 1 м<sup>2</sup>, увеличиваясь по мере снижения размеров животных.

**Численность.** Ниже приведены некоторые данные полевых определений плотности популяций представителей разных размерных групп, характеризующие связь между размером и уровнем обилия животных (табл. 19 и 20).

Связь между размером и обилием животных более четко выражена в почве, а в водной среде она модифицируется особенностями экологических условий (трофности); это можно видеть на примере болота, где на фоне общей низкой численности всех групп простейших, обилие цилиат наибольшее.

В разных типах почв и растительных ассоциаций показатели обилия почвенных животных кардинально различаются. Наиболее разнообразны комплексы беспозвоночных в лесных почвах умеренного и тропического пояса и луговых степей, т.е., в областях с наиболее оптимальным для животных сочетанием тепла и влаги. При этом соотношения обилия отдельных размерных групп в почвах разных климатических поясов широко варьируют. Например, в южной тайге максимальные значения суммарной плотности популяций микрофауны достигают 1150000 экз./м<sup>2</sup>, в лесостепных дубравах Центральной России – 70 000 экз./м<sup>2</sup>, в тропических лесах всего 16 000 экз./м<sup>2</sup>, при этом обилие мезофауны в тайге составляет 1 800 экз./м<sup>2</sup>, в дубравах – 2000 экз./м<sup>2</sup>, в тропических лесах оно достигает 7 500 экз./м<sup>2</sup> [Гиляров, Чернов, 1975; Madge, 1965].

Таблица 19

Обилие разных групп почвенных простейших, определенное методом прямого счета  
[Stout, Heal, 1967; Singh, 1946]

Группа	Средний размер, мкм	Биотоп	Численность (экз./1 г сырой почвы)
Flagellata	5	Сырая почва	75 000
		Садовая почва	4 000
		Болото	250
Amoebae	10	Сырая почва	41 400
		Садовая почва	1 750
		Болото	250
Ciliata	20	Сырая почва	377
		Садовая почва	1 750
		Болото	850

Таблица 20

Уровни численности разных размерных групп  
многоклеточных почвенных беспозвоночных, экз./м<sup>2</sup>

Группа животных	Размерная группировка, мм	Уровни обилия
Protozoa	Нанофауна (0,005–0,1)	$(1-2) \times 10^8 \dots 5 \times 10^7$
Nematoda		$(250-15000) \times 10^3$
Rotatoria		$(1-100) \times 10^3$
Acari	Микрофауна (0,1–2,0)	3 000 – 50 000
Collembola		2 000 – 15 000
Enchytraeidae		200 – 10 000
Aranea	Мезофауна (3,0–30,0)	10–80
Isopoda		10–100
Myriapoda		1–200
Coleoptera (личинки)		5–200
Diptera (личинки)		10–400

Таким образом, показатели численности почвообитающих животных определяются соотношением отдельных размерных групп, поэтому сравнительные оценки обилия животных в тех или иных почвах должны проводиться в пределах каждой отдельной размерной категории. В то же время размерная структура животного населения детерминирует характер его функционирования в почве. Взаимоотношения с другими группами почвенной биоты и влияние животного населения в целом на косные компоненты почвы.

**Зоомасса.** Величина зоомассы в почве варьирует в пределах от сотен мг до сотен граммов в 1 м<sup>2</sup>. В почвах – многочисленны дождевые черви, например, в черноземах, они составляют 200–300 г/м<sup>2</sup>. Однако мелкие размерные группировки также дают ощутимый вклад в общую зоомассу почвы. Масса голых амёб в луговых почвах умеренной зоны достигает 5 г/м<sup>2</sup>, в луговых почвах бореальных районов, где имеет место аккумуляция медленно разлагающихся растительных остатков, масса голых и раковинных амёб достигает 20 г/м<sup>2</sup> [Volz, 1951; Heal, French, 1974].

Биомасса нематод также может достигать существенных значений: наиболее высокие показатели (15–17 г/м<sup>2</sup>) отмечены в луговых и лесных почвах умеренной зоны, в то время как в тундровых, болотных и пустынных почвах она не превышает 0,1–0,3 г/м<sup>2</sup> [Sohlenius, 1980]. Биомасса коллембол в лесных почвах колеблется в пределах 0,2–0,6 г/м<sup>2</sup>, клещей – 0,8–2,0 г/м<sup>2</sup>.

Общие значения биомассы зависят от размерной структуры животного населения. В таежных почвах, где преобладают представители нано- и микрофауны, при очень высокой заселенности показатели биомассы относительно низки. В почвах под широколиственными лесами и луговой растительностью, где в сообщества педобионтов включаются многочисленные представители многоножек, личинки насекомых и дождевые черви, значения зоомассы резко повышаются.

На примере зонального ряда природных экосистем выявлены закономерные изменения зональных показателей зоомассы от типичных тундр до пустынных ландшафтов. Максимальные значения почвенной зоомассы отмечены в почвах под пологом широколиственных лесов, и этот пик совпадает с максимумом первичной продукции. К северу и югу, по мере отклонения гидротермического режима почвы от оптимума, зоомасса педобионтов снижается. Однако следует отметить, что в средней тайге и тундре величина зоомассы на порядок ниже, чем в широколиственных лесах, а к югу от лесной зоны она снижается лишь втрое. Разница показателей зоомассы почвенных животных степей и пустынь незначительна – 29,0 и 25,1 г/м<sup>2</sup> [Striganova, 1991]. Такая “асимметрия” объясняется тем, что в высоких широтах основу животного населения составляют мелкие категории – нано- и микрофауна с относительно низкой суммарной биомассой. По мере продвижения на юг в почвенных сообществах начинают играть все большую роль крупные животные – мезофауна. В почвах аридных районов они доминируют по численности и видовому разнообразию. Поэтому при снижении средних показателей численности педобионтов по градиенту нарастания аридности климата снижение зоомассы идет не очень быстро. Показатели численности и биомассы, безусловно, являются интегральными характеристиками, отражающими степень заселенности почвы животными. Однако они не могут быть адекватной мерой напряженности зоотических процессов, принимая во внимание высокое таксономическое, экологическое и фаунистическое разнообразие животного населения.

**Суммарный метаболизм.** Одной из важных функциональных характеристик животного населения как компонента почвенной биоты является интенсивность суммарного метаболизма. Известно, что величина энергозатрат ( $Q$ ) на основной обмен описывается экспоненциальным уравнением  $Q = A \times W^b$ , где  $W$  – масса организма,  $A$  и  $b$  – константы этого уравнения, которые рассчитаны для большинства основных групп почвенной фауны [Бызова, 1973; 1976]. В табл. 21 приведены примеры зависимости интенсивности энергообмена от массы тела у представителей разных размерных группировок почвенной фауны. На фоне вариабельности показателей скорости метаболизма, определяемых спецификой отдельных групп животных, их возрастными и физиологическими особенностями. Четко выражена тенденция к снижению энергетических затрат на единицу массы тела по мере увеличения размеров и массы животных.

Для оценки потока энергии через популяции отдельных видов и групп педобионтов, использовали разные методы экстраполяции экспериментальных респираторных данных, и определение энергопотребностей и энергобюджета конкретных видов проводили в расчете на “среднюю особь” по величине массы тела [Dunger, 1962; Grodzinski, Klekowski, Duncan, 1975]. Были построены модели

Таблица 21

Зависимость интенсивности дыхания (Q) от массы тела (W) при 20 °С [Бызова, 1973]

Группа	Масса тела, г	Зависимость дыхания (Q) от массы тела (W)
Nematoda	$(0,1...56,0) \times 10^{-6}$	$117,4 W^{0,84}$
Oribatei	$(1,0...625,0) \times 10^{-6}$	$23,0 W^{0,64}$
Collembola	$(0,007...7,0) \times 10^{-3}$	$23,0 W^{0,64}$
Isopoda	$(0,6...800,0) \times 10^{-3}$	$61,3 W^{0,60}$
Tipula (личинки)	0,03...0,27	$15,0 W^{0,52}$
Amphimallon (личинки)	0,013...0,934	$213,0 W^{0,82}$

потока энергии через наземные экосистемы, включая все компоненты почвенной биоты [Engelmann, 1961, Macfadyen, 1963]. На основе расчетов энергопотока через многовидовые популяции почвенных организмов было показано, что дыхание почвенной фауны составляет лишь 15% от общего дыхания почвы, причем, 7–8% приходится на долю почвенных простейших. Однако современные данные по дыханию почвенных животных и определения соотношения основного и активного обмена показывают, что эти расчеты для многоклеточных форм явно занижены (табл. 21). У большинства почвенных обитателей величина коэффициента экологической продуктивности ( $K_2$ ), характеризующего отношение продукции к ассимилированной пище [Ивлев, 1955], различается в широких пределах. У животных с короткими жизненными циклами (до 1 года) этот коэффициент составляет у панцирных клещей – 21,4%, у коллембол *Onychiurus procamptus* – 46,2%, у мокриц – 18,0%; у длиннопериодических форм, например, у дождевых червей *Aporrectodea rosea* – 24,3% [Grodzinski et al., 1975]. Поэтому имеющиеся расчеты потока энергии через сообщества педобионтов отражают лишь 75–80% их потребностей без учета затрат на рост и размножение. Кроме того, у животных, передвигающихся в минеральной почве, особенно у роющих форм, энергозатраты на активный метаболизм могут на порядок превышать потребление кислорода в состоянии покоя. У диплопод *Cylindroiulus burzenlandicus* активный обмен почти в 300 раз выше, чем уровень основного обмена [экспериментальные данные Н.М. Мешковой]. На современном уровне изученности структуры и динамики популяций педобионтов, их пищевых потребностей, роста и репродукционного потенциала, возможно, построить более адекватные модели энергобюджета и дать реальную оценку вклада животных в поток энергии, идущий через почвенный ярус наземных экосистем.

### Разнообразие животного населения почвы

Происхождение разнообразия животного мира почвы рассматривалось М.С. Гиляровым [1949; 1970] в свете эволюционных проблем выхода животных на сушу и приспособления пойкилотермных форм к обитанию в условиях переменного гидротермического режима. Основные особенности почвы, обуславливающие высокое разнообразие ее населения – трехфазность и полидисперсность. Высокое содержание свободной влаги обеспечивает возможность существования в почве водным формам, дышащим кислородом, растворенным в воде, а также животным, не имеющим защиты от испарения воды через покровы. Большой запас воздуха с парциальным давлением кислорода, близким к наземному ярусу, позволяет обитать в почве аэробными формам, чувствительным

Таблица 22

## Видовое богатство основных групп почвообитающих беспозвоночных мировой фауны

Таксономическая группа	Число видов	Таксономическая группа	Число видов
Protista	500	Isopoda (наземные мокрицы)	1 000
Nematoda	11 000	Onychophora	70
Rotatoria	2 000	Myriapoda	15 000
Enchytraeidae	400	Protura	200
Lumbricomorpha	200	Diplura	200
Acari	17 000	Collembola	3 500
Arachnoidea (кроме Acari)	54 250	Insecta	180 000
Tardigrada	300	Mollusca (наземные легочные)	30 000

к газовому режиму. Плотность почвенного субстрата задерживает испарение влаги и снижает амплитуду суточных и сезонных колебаний температуры, что весьма существенно для стенобионтных форм.

Полидисперсность почвы и наличие многочисленных разноразмерных полостей создает систему укрытий для многочисленных животных разного размера и в то же время позволяет им передвигаться в системе полостей в поисках пищи, полового партнера, оптимальной гидротермической ниши и пр. В процессе эволюции почва заселялась животными из воды и наземного яруса, что обусловило большое разнообразие адаптаций к обитанию в почве и формирование активных стратегий кондиционирования почвенной среды и создание системы пространственных ниш зоотического происхождения, например, ходы дождевых червей, подземные гнезда термитов, муравьев и пр. [Стриганова, 1996]. Структурные особенности почвенной среды позволяют поддерживать в ней многовидовые сообщества животного населения с высокими индексами обилия многих групп при относительно низком конкурентном прессе.

В глобальном масштабе видовое разнообразие фауны почвенных беспозвоночных (геобионтов и геофилов) составляет примерно треть от общего числа известных видов (табл. 22). В одном местообитании встречается до нескольких сотен видов беспозвоночных, относящихся к одной размерной группировке. Например, количество видов раковинных амёб в лесной почве составляет 60–70, число видов гамазовых клещей – 25–53, количество видов насекомых, относящихся к группировке мезофауны – 20–150.

Показатели локального разнообразия животного населения в почве выше, чем в наземном ярусе: среднее видовое богатство почвенной фауны на единицу площади (альфа-разнообразие) превышает таковое в наземной среде. Если принять во внимание, что в почвенном профиле животное население сосредоточено лишь в верхнем горизонте, то индекс разнообразия видов на единицу объема оказывается еще выше, чем, например, в растительном ярусе.

Относительно экологических возможностей, обеспечивающих столь высокое разнообразие животного населения почвы, была выдвинута гипотеза, предполагающая постоянный избыток ресурсов в почве, благодаря наличию механизмов регуляции популяций животных на уровне, не позволяющем полностью исчерпать ресурсную базу [Anderson, Healey, 1970]. Такими механизмами могут быть пресс хищников, влияние климатических факторов и разделение трофических ниш. Исследования специфики распределения животных в почве и их пищевых потребностей показали, что ведущими факторами снижения конкурентного прес-

са при наличии высокого разнообразия является сегрегация пространственных, временных и трофических ниш между отдельными видами и группами.

Разделение пространственных ниш обусловлено с одной стороны большими размерными различиями отдельных представителей почвенной фауны, с другой – полидисперсной структурой самой почвенной массы. Представители нанофауны занимают капиллярные полости, заполненные капельной влагой, и локализуются в водной пленке на поверхности почвенных частиц, удерживаемые силой поверхностного натяжения. Более крупные аэриобионтные беспозвоночные обитают в более объемных воздушных полостях, трещинах, корневых ходах. В ризосфере растений плотность популяций мелких педобионтов выше, чем вне этой зоны, что особенно хорошо заметно в местообитаниях с разреженным растительным покровом [Стриганова, 1994].

Животные могут мигрировать в почве по системе полостей. Суммарный объем воздушных полостей ограничивает степень заселенности почвы. Известно, что в почвах с меньшим объемным весом численность микрофауны выше, чем в более плотных почвах [Abrachamsen, 1972]. Крупные беспозвоночные обитают в полостях и ходах, которые они роют в почве. Эта группировка – единственная, для которой почва представляет плотный субстрат, и для них передвижение требует больших энергозатрат для преодоления сопротивления твердой массы. Создание системы почвенных ходов роющими крупными животными обеспечивает дополнительное пространство, пригодное для заселения мелких форм. Вокруг ходов дождевых червей отмечена повышенная численность микроартропод и мелких личинок двукрылых. Это показывает, что при заселении почвы животными разных размерных групп между ними формируются синергические отношения. Кроме того, в почвенных сообществах складываются симбиотические отношения между разными группировками почвенной биоты. При этом деятельность животных является одним из ведущих факторов, способствующих росту корней, углублению корнеобитаемого слоя, развитию микробных процессов в минеральном слое, что в свою очередь создает благоприятные условия для обитания животных. Таким образом, между разнообразием животного населения и разнообразием других компонентов почвенной биоты существует прямая-обратная положительная связь.

### Структура животного населения почвы

**Степень связи с почвенной средой.** При оценке функционального значения почвенных беспозвоночных имеет значение степень их связи с почвенной средой обитания. По этому признаку М.С. Гиляров [1949] выделил три основные группы: 1) геобионты – беспозвоночные, обитающие в почве в течение всего жизненного цикла (черви, микроартроподы, многоножки, жуки-жужелицы, стафилиниды и др.); 2) геофилы – беспозвоночные, у которых отдельные стадии развития облигатно связаны с почвой (крылатые насекомые); и 3) геоксены – беспозвоночные и кратковременно находящиеся в почве и поисках укрытия от неблагоприятных погодных условий хищники и пр. Последняя группа не играет активной роли в почвенных процессах. Значение таких временных обитателей состоит лишь в том, что они представляют резерв для питания почвенных хищников, величину которого трудно прогнозировать. Геофилы активно включаются в динамику почвенных процессов при условии, если в почве проходят активные стадии их онтогенеза, связанные с питанием и расселением. В этих случаях они, вместе с постоянными почвенными обитателями, участвуют в деградации растительных остатков, формировании почвенного профиля. Послед-

нее относится в первую очередь к насекомым, у которых в почве происходит развитие ювенильных стадий (яйцо-личинка-куколка). Среди почвенных личинок крылатых насекомых много фитофагов-потребителей корней, представляющих важный фактор, который определяет первичную продуктивность представители семейств жесткокрылых Scarabaeidae, Elateridae, Tenebrionidae, Alleculidae и др.). Хищные личинки (жесткокрылые – Cantharidae, Coccinellidae, двукрылые – Eginidae, Stratiomyidae, Asilidae, Rhagionidae, Tabanidae, Dolychopodidae и др.) при высокой численности могут эффективно контролировать обилие мелких групп педобионтов. Кроме того, многие насекомые, развивающиеся в почве, строят в почве систему полостей и камер для откладки яиц и выведения личинок. Личинки в процессе расселения и поиска пищи продельвают систему ходов. Потребители корней отчуждают часть корневой массы, но в то же время, разрыхляя почву в прикорневой зоне, способствуют росту корней и углублению корнеобитаемого слоя. Таким образом, умеренный пресс ризофагов в почве снижает величину корневой массы, но увеличивает продукцию корней. Животные, постоянно обитающие в почве, формируют трофическую сеть, в которой преобладают детритные цепи. Отдельные группы беспозвоночных включаются в пищевые цепи на разных трофических уровнях, реализуя масс-энергообмен между разными компонентами почвенной биоты (корни-микрофлора-животные), между растением и почвой, между органическими остатками и минеральной массой почвы.

**Пространственная структура.** Между представителями одной размерной группировки наблюдается четкое разделение пространственных ниш по горизонтали и почвенному профилю. В структуре животного населения четко выражена приуроченность отдельных форм к определенным генетическим горизонтам. Прежде всего, в комплексе педобионтов выделяется блок подстилочных форм, который наиболее разнообразен в лесных почвах, где подстилка сохраняется в течение всего вегетационного сезона. При этом основная масса животных концентрируется в ферментативном слое подстилки, поддерживающем достаточную влажность в течение всего лета, где животные находят благоприятные гидротермические условия и доступные пищевые ресурсы. Они мигрируют между подстилкой и гумусовым горизонтом и опускаются в более глубокие слои лишь при неблагоприятных условиях для перенесения диапаузы. Такие типичные подстилочные обитатели, питающиеся листовым опадом, как диплоподы, опускаясь в минеральный горизонт почвы для зимней или летней диапаузы, опустошают свой кишечник и переходят в анабиотическое состояние [Стриганова, 1980]. Таким образом, их активная деятельность ограничена лишь подстилочным слоем. Основная масса почвенных форм концентрируется в корнеобитаемом горизонте: большинство нехищных форм связано либо с живыми корнями, либо с микрофлорой, разрушающей остатки корней. М.С. Гиляров [1947] установил пространственную корреляцию между распределением корней растений по почвенному профилю, мощностью гумусового горизонта и глубиной ходов животных. Внутрпочвенные формы, мигрируют между гумусовым и минеральными горизонтами. Направление их вертикальных миграций и глубина локализации в активные периоды зависит от климатических условий и моментальных гидротермических изменений. В холодном климате животные концентрируются у поверхности почвы в наиболее прогреваемом горизонте. В высокогорьях обитатели дернины и подстилки переходят к обитанию на поверхности почвы [Striganova, 1992]. В теплом климате, особенно в аридизированных условиях, животные уходят в глубокие горизонты ниже границы распространения мелких корней растений, где перестают питаться. Имеется также группа форм,

обитающих в глубоких норах и совершающих регулярные вертикальные миграции по своим постоянно поддерживаемым ходам. К ним относятся норные дождевые черви (*Lumbricus terrestris*), пустынные мокрицы *Hemilepistus* и др. В ходах на большой глубине они находятся в условиях относительно выровненного гидротермического режима. Но их питание связано с поверхностью почвы, так как они потребляют наземный опад. У норных форм в процессе эволюции выработались специфичные сложные формы поведения – рытье и поддержание нор, укрепление стенок нор прижизненными выделениями, сбор корма, транспортировка его в нору и пр. У пустынных мокриц с поверхностью почвы связана не только добыча пищи, но и дефекация: будучи чувствительны к газовому составу воздуха в норе, они регулярно выбрасывают на поверхность почвы накопившиеся экскременты и остатки пищи. Таким образом, характер вертикального распределения почвенных беспозвоночных позволяет судить о степени заселенности разных горизонтов почвенного профиля и об их связях с фитомассой (наземный опад, корни). В пределах одного генетического горизонта наблюдаются значительные различия в характере горизонтального распределения отдельных групп и видов животных. Это определяется различиями их экологических предпочтений и пространственными вариациями гидротермического, солевого режима почвы, pH и механического состава. В подстилке и гумусовом горизонте имеют место резкие суточные и сезонные перепады температуры, которые сглаживаются в минеральной почве и ослабевают с глубиной. Соответственно у поверхности почвы более резко выражены различия точечного разнообразия многовидовых локальных сообществ. Микроклиматические различия определяются характером микрорельефа и структурой растительного покрова, обуславливающего состав и величину детритного потока в почву. Количественные учеты распределения и пищевой активности диплопод в широколиственном предгорном лесу Карпат показали, что в отдельных парцеллах с разным составом напочвенного покрова, видовой состав животных достоверно различался, и характер распределения отдельных видов варьировал от случайного до агрегированного. Это определяло и парцеллярные различия темпов разрушения листовой подстилки [Стриганова, 1974]. Различие в отдельных парцеллах составляло более, чем в два раза.

Сегрегация пространственных ниш определяется различиями биотопических предпочтений педобионтов, чувствительных к влажности почвы, ее механическому составу, кислотности и солёности. В составе животного населения почвы имеются формы с очень узкими предпочтениями в отношении некоторых факторов среды обитания. В этих случаях они являются эффективными индикаторами соответствующих почвенных свойств, на чем основано использование животных для зоологической индикации состояния почв и направленности почвенных процессов [Гиляров, 1965].

**Трофическая структура.** В большинстве публикаций в составе животного населения почвы выделяется четыре основные трофические группировки – сапрофаги, фитофаги, хищники и миксофаги (формы со смешанным питанием). В почве формируются трофические цепи, основанные на использовании продукции живых корней (пастбищные цепи) и растительного опада (детритные цепи). В высокопродуктивных почвах основной поток энергии направлен по детритным пищевым цепям. Основная масса организмов использует энергию, связанную в растительных остатках и обеспечивает их быстрое разложение и минерализацию, определяя быстрые темпы биологического круговорота и относительно полное высвобождение элементов питания, аккумулярованных в мортмассе. В почвах некоторых экосистем, в частности, в агроцено-



зах преобладают пастбищные пищевые цепи, исходной базой которых являются живые растительные ткани (корни, приземные части стеблей). В природных экосистемах преобладание пастбищных пищевых цепей характерно для аридных регионов, где в структуре животного населения почвы блок фитофагов занимает ведущее место. В умеренном поясе в трофической структуре почвенных сообществ доминируют сапрофаги по численности и биомассе. В широколиственных лесах и луговых сообществах доля сапрофагов составляет 70–80% от общей зоомассы.

Пищевые цепи в почве представляют собой открытые системы, тесно связанные с наземным ярусом. Прежде всего, эта связь проявляется в том, что существенная часть пищевого рациона почвенных обитателей поступает из надземного яруса в виде листового опада и древесного опада, разлагающегося в почве и на ее поверхности. Во-вторых, многие почвенные и подстилочные формы (дождевые черви, личинки насекомых) представляют пищевой ресурс для наземных животных – насекомоядных млекопитающих, птиц, амфибий. В свою очередь и некоторые, поверхностно обитающие почвенные хищники могут использовать ресурсы почвенного яруса. Например, в агроценозах жужелицы и коротконадкрылые жуки нередко питаются тлями, которых они добывают на стеблях и листе травянистых растений. Личинки типулид, относящиеся к преимущественным сапрофагам, при пересыхании растительного детрита в верхнем почвенном горизонте питаются зелеными тканями нижней части стеблей [Стриганова, 1978]. Аналогичные наблюдения были сделаны и на диплоподах, способных переходить к питанию проростками травянистых растений при пересыхании листового опада [Striganova, 1972]. Таким образом, животные реализуют масс-энергетический обмен между почвенным и наземным ярусами и на гетеротрофных уровнях пищевых цепей.

Группировка сапрофагов неоднородна и включает формы, различающиеся по своей пищевой специализации и связанные с разными компонентами почвенной мортмассы. Долгое время сапрофаги рассматривались как неспециализированные формы, потребляющие органические остатки разного происхождения и усваивающие преимущественно микрофлору, которая в массе развивается в этих остатках. Между тем, специальные исследования пищевого предпочтения отдельных видов выявили наличие определенной специализации в отношении вида растительных остатков и стадии их предварительного разрушения, на основании чего была предложена схема трофической структуры сапроблока почвенных животных [Стриганова, 1980]. В этой схеме предлагается выделение следующих группировок:

- первичные разрушители растительных остатков;
- вторичные разрушители;
- детритофаги;
- микробофаги.

Анализ ресурсной базы сапротрофного комплекса педобионтов, морфо-функциональных адаптаций их ротового аппарата и кишечника, характера пищеварения показывает, что это разнородная группировка почвенных беспозвоночных, которых нельзя объединить общим типом или режимом питания. В сапроблок включаются формы с сосущими и грызущими ротовыми аппаратами, способные потреблять жидкие органические продукты разложения, взвеси мелких органических частиц в воде, микробиальные клетки, а также размельчать и заглатывать крупные частицы растительных или животных остатков.

**Первичные разрушители, потребители опада.** К ним относится ряд крупных форм, мезопедобионтов, которые разрушают листовую и травянистый опад и

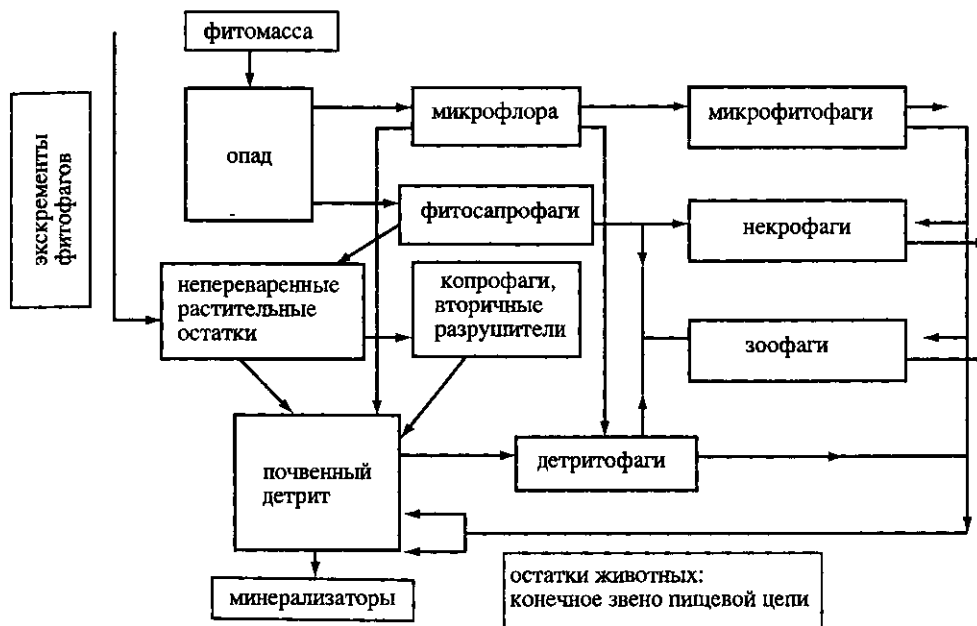


Рис. 20. Схема детритной пищевой цепи в почве [по Стригановой, 1980]

остатки древесины в верхнем листовом слое постилки и формируют копрогенную массу, опускающуюся в нижний слой подстилки и гумусовый горизонт. В копролитах животных имеет место первичное перемешивание органических и минеральных частиц, частичное разложение клетчатки, обогащение почвенной микрофлорой.

**Вторичные разрушители** – преимущественно мелкие формы (микроартроподы, энхитреиды), заселяющие ферментативный слой подстилки или ризосферу растений, где особенно высока концентрация разлагающегося органического материала. Они потребляют уже размельченные первичными разрушителями частицы в их экскрементах, утилизируя промежуточные продукты распада полисахаридов и микрофлору, осуществляющую разрушение лигно-целлюлозного комплекса.

**Детритофаги** – потребители органического аморфного детрита, диспергированного в минеральной массе почвы. Наиболее яркие представители детритофагов – дождевые черви. Однако к этой трофической группировке относятся и многочисленные представители личинок жесткокрылых и двукрылых насекомых, отдельные виды диплопод (Polyzoniidae), коллембол.

**Микробофаги (или микрофитофаги)** – потребители бактериальных пленок, микромицетов, почвенных водорослей. К ним относятся многочисленные представители почвенной микрофауны. Среди последних микроартроподы – особенно эффективные потребители грибов, регулирующие обилие и видовой состав почвенных микромицетов в разлагающихся органических остатках.

На рис. 20 представлена схема детритной трофической цепи на примере экосистемы широколиственного леса, где наиболее полно представлены все функциональные группы. В левом вертикальном ряду три блока представляют органические остатки в почве на разных стадиях разложения: опад разных частей растений, непереваренные остатки, прошедшие ферментативную и микробиальную обработку в кишечнике наземных и почвенных животных и

аморфный детрит, в котором органические частицы, перемешанные с минеральными компонентами, потеряли свою структурную и биохимическую специфику. Блоки среднего ряда представляют отдельные трофические группировки почвенных организмов, относящихся к сапроблоку – сапротрофную микрофлору, первичных (фитосапрофаги) и вторичных разрушителей. К последним относятся и копрофаги. В почвенных сообществах очень широко распространена копрофагия. Описаны случаи “автокопрофагии” у мокриц и диплопод [Стриганова, 1980]: животные потребляют растительный опад, который переваривают в очень небольшой степени, а также собственные экскременты, полежавшие в почве и заселенные микрофлорой, активно разрушающей лигно-целлюлозный комплекс. В экскрементах животные усваивают легко усвояемые продукты микробного распада структурных компонентов растительных тканей, которые служат основным энергоресурсом, а потребность в белковой пище удовлетворяется за счет микробной массы. Автокопрофагия рассматривается как одна из примитивных форм симбиотических зоо-микробных отношений, характерных для животных, у которых отсутствует комплекс облигатных симбионтов в кишечнике.

В отличие от водных сообществ, в почве основу органического материала детритного потока составляют структурные компоненты растительных тканей, отличающиеся высокой устойчивостью. Их разложение и минерализация осуществляется комплексом ферментов, растянуто во времени и реализуется при участии различных функциональных групп организмов, которые сменяют друг друга в сукцессионном ряду и используют отдельные промежуточные продукты разложения клетчатки и лигнина в качестве энергоресурса. Поэтому особенностью почвенной детритной пищевой цепи продукты биогенной переработки органических остатков одними формами оказываются пищевым ресурсом для других групп. При этом у животных установлена пищевая специализация в отношении степени предварительного разрушения растительного материала, хотя многие сапрофаги по признаку широты видового спектра потребляемых видов растений являются полифагами. Таким образом, у почвенных сапрофагов формирование пищевых режимов и пищевого преферендума подчиняется иным принципам, кардинально отличающихся от таковых у фитофагов. Последние специализированы к биохимическим особенностям отдельных видов или групп кормовых растений, у которых прижизненные выделения оказывают аттрактивный или репеллентный эффект на потенциального потребителя.

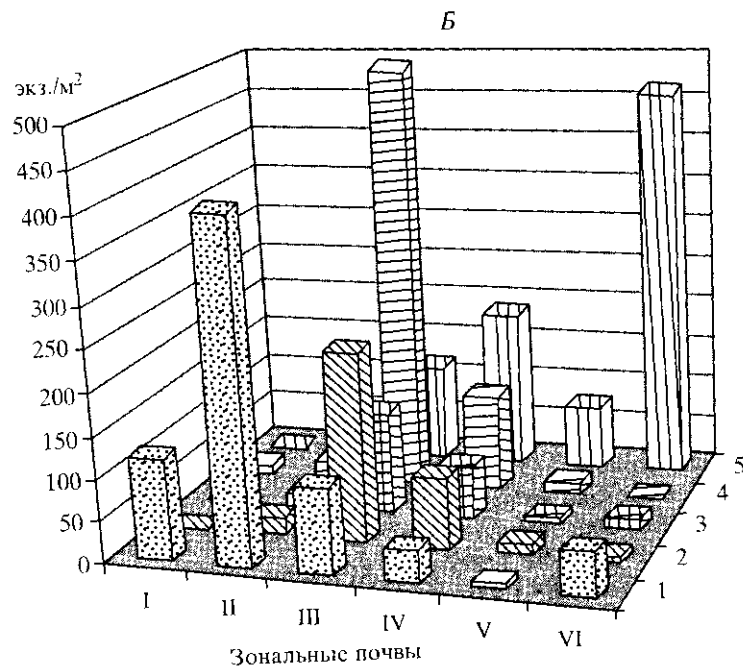
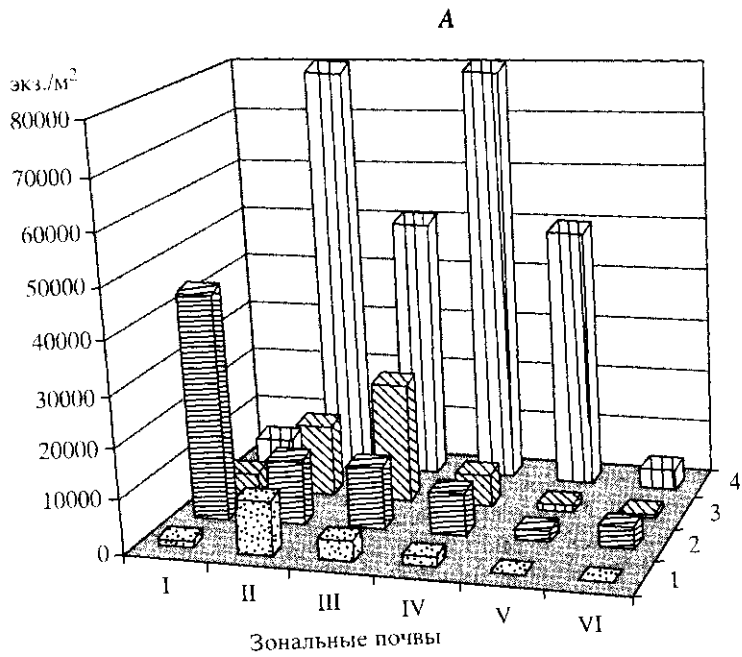
Таким образом, животные почвенного сапроблока включаются в детритные пищевые цепи на разных трофических уровнях. Но и на одном уровне, в частности, на базовом уровне почвенной мортмассы наблюдается жесткая дифференциация трофических группировок, сменяющих друг друга в сукцессионном ряду на разных стадиях механической и химической деструкции органического материала (рис. 20). Это определяет высокую напряженность процессов зоотической деструкции растительного материала и высокую полноту использования аккумулированной в нем энергии.

Сложность пространственной и трофической структуры животного населения обеспечивает четкое разделение ресурсов и определяет высокую эффективность животных в потоке энергии по трофическим цепям.

## Зонально-региональные изменения состава и структуры животного населения

**Зональные изменения уровня численности животных.** Функциональная структура и разнообразие животного населения почв кардинально различаются в разных почвенно-климатических зонах. На рис. 21 показаны зональные изменения состава и численности наиболее многочисленных групп животного населения зонального ряда почв от тундр до полупустынь на примере Европейской части России [Гиляров, Чернов, 1975]. В составе почвенной микрофауны выделяются по обилию энхитреиды и представители микроартропод (рис. 21А). Среди последних выделяются две большие группировки сапрофагов – коллемболы и панцирные клещи (*Oribatei*) и хищные клещи (*Gamasoidea* и *Tyroglyphoidea*). Наиболее высокие уровни обилия характерны для орибатид, численность которых в таежных и широколиственных лесах достигает десятков тысяч на м<sup>2</sup>. Оптимум гидротермических условий и запаса ресурсов они находят на протяжении всей лесной зоны и в луговых степях. Далее к югу их обилие существенно снижается. У хищных клещей четко выражено предпочтение зоны широколиственных лесов. У коллембол максимум обилия отмечен в тундровой зоне, эти формы особенно многочисленны в моховых местообитаниях. За пределами лесной зоны их обилие резко снижается. Энхитреиды предпочитают кислые почвы тайги. К югу их численность постепенно снижается, а в полупустыне они встречаются лишь в азональных группировках, связанных с древесно-кустарниковой растительностью на пониженных элементах рельефа. Среди мезофауны по уровням обилия выделяются группировки жуков, личинок двукрылых и дождевых червей (рис. 21 Б). У двукрылых максимум обилия почвенных личинок в тайге за счет многочисленных представителей семейств длинноусых двукрылых. Общее обилие личинок мух к югу снижается. У жуков наблюдается противоположная тенденция – увеличение обилия с севера на юг с максимумом в полупустынных почвах. Тренды зонального распределения дождевых червей, многоножек и мокриц совпадают: максимумы обилия отмечены под пологом широколиственных лесов. К югу и северу показатели численности этих групп снижаются.

**Зональные различия состава животного населения.** Ниже приводится краткая характеристика особенностей таксономического состава и структуры животного населения почв в зональных ландшафтах Русской равнины от южной тундры до полупустыни [Стриганова, 1996; 1997]. В тундре наличие многолетней мерзлоты, глубокое промерзание почвы зимой, избыточное увлажнение и слабая аэрация летом, а также краткость теплого периода определяют особенности состава почвенного животного населения и его ярусного распределения. Животные заселяют лишь верхний почвенный горизонт мощностью до 5–7 см. В составе населения доминируют коллемболы (25–40 тыс. экз./м<sup>2</sup>) и энхитреиды (500–1200 экз./м<sup>2</sup>). Последние составляют 35–55% от общей численности педобионтов. В переувлажненной моховой дернине встречаются также почвенные червецы *Arctothezia cataphracta*, характерные для заболоченных северных местообитаний. Численность мезофауны колеблется в пределах 40–100 экз./м<sup>2</sup>. Среди мезонаселения преобладают личинки двукрылых семейств Tipulidae, Lycoriidae, Tendipidae, Cecidomyidae, Dolichopodidae, Empididae, представленные видами, типичными для зоны тундр и для северных болот. В подзоне южных кустарничковых тундр значительную роль начинают играть дождевые черви (*Dendrobaena octaedra*, *Eiseniella tetraedra*), распространение которых ограничено дренированными почвами хорошо прогреваемых



**Рис. 21. Зональные изменения обилия основных групп почвенной фауны**  
 А – микрофауна: 1 – энхитреиды, 2 – коллемболы, 3 – хищные клещи, 4 – панцирные клещи; Б – мезофауна: 1 – личинки двукрылых, 2 – мокрицы, 3 – многоножки, 4 – дождевые черви, 5 – жесткокрылые.  
 Зональные ландшафты: I – тундра, II – тайга, III – широколиственные леса, IV – луговые степи, V – сухие степи, VI – полупустыни

местообитаний. Комплекс жесткокрылых представлен семействами Carabidae, Staphylinidae, Byrrhidae, Curculionidae (*Otiorrhynchus*), включающими виды, широко распространенными в лесах бореальной и умеренной зон. В южной тундре часто встречаются также многоножки-литобииды *Monotarsobius curtipes* с широким полизональным ареалом.

В лесотундре численность животных несколько выше, обилие мезофауны достигает 190 экз./м<sup>2</sup>. Основная масса животных концентрируется на открытых местах. Под березовыми колками и хвойным криволесьем дольше сохраняется снеговой покров, и верхний слой почвы прогревается медленнее. В то же время в составе животного населения увеличивается доля форм, характерных для таежных лесов. Почвенная фауна лесотундры представляет обедненный вариант таежного комплекса и включает преимущественно формы с трансзональными ареалами. Многочисленными становятся литобииды, появляются группировки активных разрушителей листового опада – личинки мух *Bibionidae* и *Lycogiidae*, встречающиеся большими агрегациями. Они приурочены к местам скопления листового опада, предпочитая ольшаники на пониженных элементах рельефа.

В тайге основная часть животного населения смещается под полог леса. В составе почвенных сообществ преобладают микроартроподы, суммарная численность которых почти на порядок выше, чем в тундре. В темнохвойных лесах обилие микроартропод достигает 200 экз./м<sup>2</sup>, в сосняках на легких почвах оно вдвое ниже – до 90 экз./м<sup>2</sup>, и в заболоченных лесах – всего 50 экз./м<sup>2</sup>. В отличие от тундры, в комплексах микроартропод в тайге преобладают панцирные клещи, доля которых составляет 68% от общего обилия. В этой зоне отмечен максимум обилия энхитреид, достигающий 10 тыс. экз./м<sup>2</sup>.

В подзоне северной тайги Европейской России численность мезофауны в разных типах местообитаний составляет 50–400 экз./м<sup>2</sup>. В зональных типах леса наиболее богато представлены почвообитающие личинки двукрылых (*Chironomidae*, *Limnobiidae*, *Tipulidae*, *Heleidae*, *Tabanidae*, *Rhagionidae*, *Dolichopodidae*, *Muscidae*). В некоторых местообитаниях вес личинок мух в комплексах мезофауны составляет 90%. Среди почвенных жуков преобладают личинки щелкунов (*Elatерidae*), представленные видами, ареалы которых заходят далеко на север в тундру. Дождевые черви под пологом леса единичны. Основная их масса сосредоточена на открытых участках с луговой растительностью. Из многоножек встречаются подстилочные литобииды и единичные диплоподы, предпочитающие хорошо прогреваемые дренированные участки. В подзоне средней тайги уровни обилия мезофауны практически такие же, как в северной тайге – 44–310 экз./м<sup>2</sup>, но групповое и видовое разнообразие значительно выше. По обилию доминируют насекомые (25%), второе и третье место занимают пауки (17%) и многоножки (13%). Среди жесткокрылых высокие показатели видового богатства и обилия характерны для журилиц, стафилинид, щелкунов и мягкотелок. Двукрылые сохраняют высокую численность, но их относительный вес в сообществах снижается. В средней тайге относительно большое значение приобретают дождевые черви, представленные преимущественно видами, ареалы которых простираются за пределы северных границ тайги (*Bimastus tenuis*, *Dendrobaena octaedra*, *Eiseniella tetraedra*, *Octolasion lacteum*). В частности, увеличивается обилие червей в зональных экосистемах темнохвойных лесов. В южной тайге обилие мезофауны колеблется в пределах 53–120 экз./м<sup>2</sup>. Максимальные показатели численности здесь ниже, но средние и минимальные значения выше, чем в северных подзонах тайги. Численность и разнообразие животных в зональных местообитаниях резко возрастают; отличительной особен-

ностью является и то, что животные заселяют минеральный слой почвы до глубины 15 см, при этом большая часть зоомассы (дождевые черви, личинки насекомых) смещается из подстилки в минеральный слой. Основное ядро почвенной фауны представлено видами, широко распространенными в разных зонах, включая лесостепные ландшафты и южные тундры. Здесь смешиваются формы с различными экологическими стандартами – лесные мезофилы, гигрофилы, виды лесоболотной группы, умеренные ксерофилы (*Cymindis vaporarium*, Carabidae), а также лугово-степные виды, занимающие наиболее прогреваемые сухие участки. Повышается видовое разнообразие дождевых червей и особенно многоножек. Среди последних возрастает разнообразие и обилие диплопод и землянок Geophilidae, обитающих в минеральной почве.

Зона хвойно-широколиственных лесов хорошо выражена в равнинном ландшафте Европейской России, к востоку она сужается и практически исчезает за Волгой. Характерными зональными группировками на Русской равнине являются сложные ельники с примесью липы и дуба. Общая численность мезофауны составляет 150–600 экз./м<sup>2</sup>. Самые значительные отличия от тайги наблюдаются в структуре животного населения. Более половины от общего обилия составляют дождевые черви. В сообществах мезофауны большую роль играют пауки (50–60 видов), среди которых доминируют Lynifiidae. В комплексе жесткокрылых доминируют личинки жуков-щелкунов, как и в таежных лесах. В составе подстилочных и почвенных беспозвоночных сочетаются виды, ареалы которых в основном расположены в бореальной зоне (*Carabus polaris*, *Pelophila borealis*, *Trachypachys zetterstedti*, *Elaphrus jakovlevi* – Carabidae, *Sphaerites glabratus* – Sphaeritidae, *Epurea lapponica*, *E. palustris* – Nitidulidae, *Adelocera conspersa*, *Corymbites cupreus*, *Selatosomus melancholicus* – Elateridae, *Syneta betulae* – Chrysomelidae, *Tragosoma depressum* – Cerambycidae) и южные формы, северная граница распространения которых ограничивается смешанными лесами (*Aporrectodea rosea* – Lumbricidae, *Athous haemorrhoidalis* – Elateridae). В смешанных лесах расширяется разнообразие групп, связанных топическими и трофическими отношениями с листовыми породами деревьев (личинки пластинчатоусых, рогачей, листогрызцов, трубоквертов, долгоносиков), при этом с севера на юг наблюдается смена состава доминантов от видов, связанных с березой, к формам, связанным с широколиственными породами.

В зоне лесостепи животное население почв под пологом островных лесов и в открытых травянистых местообитаниях характеризуется высокими показателями обилия (109–130 экз./м<sup>2</sup>) и разнообразия. Большая часть зоомассы сосредоточена в минеральном горизонте, что определяется недостатком влаги в подстилке и верхних слоях почвы весной и летом. Мощность заселенного животными горизонта составляет в среднем 40–60 см и в южных районах лесостепи достигает 1 м и более. В составе мезофауны доминируют дождевые черви, составляющие 50–70% от общей численности и 80–90% зоомассы. Здесь наиболее многочисленны *Aporrectodea caliginosa*, представленная двумя формами – *typica* и *trapezoides* и *A. rosea*. Численность энхитреид ниже, чем в тайге – 3–4 тыс. экз./м<sup>2</sup>.

Отличительной чертой лесостепных комплексов животного населения является высокое обилие многоножек. Среди них большую роль играют обитающие в минеральном горизонте хищные землянки и диплоподы – первичные разрушители наземного опада. В лесостепи они многочисленны не только под пологом леса, но и в лугово-степных группировках, где активно разрушают травяной опад. Под пологом островных лесов преобладают дубравные и кустарнико-

вые виды личинок насекомых. В открытых местообитаниях большую роль играют корнегрызущие формы (личинки пластиначатоусых, долгоносиков, земляных блошек), а также обитающие в подстилке растительной почвы полужесткокрылые (Myridae, Lygaeidae). Под пологом травянистой растительности животное население отличается экологическим спектром по признаку гидро-термо-преферендум: там обитают вместе луговые мезофилы и умеренные ксерофилы. Преобладающей группировкой являются политопные лугово-степные формы с широкими ареалами (*Anomala dubia*, *Phyllopertha horticola*, *Athous limonius*, виды *Cardiophorus*, *Crypticus quisquilius*, *Pentodon idiota*, *Epicometis hirta*, *Hoplia parvula*, *Valgus hemipterus*, *Pedinus femoralis* и др.).

В сообществах микрофауны коллемболы сохраняют уровни обилия, характерные для лесных почв с хорошо развитой подстилкой. Они составляют до 14% от общей численности микроартропод. Доля панцирных клещей за пределами лесной зоны несколько снижается (до 55%), одновременно возрастает относительное обилие тироглифоидных клещей (23%).

В степях на обыкновенных и южных черноземах (северные степи) численность почвенной мезофауны колеблется в пределах 80–300 экз./м<sup>2</sup>. В разнотравно-ковыльных группировках относительно высокая численность дождевых червей. К югу их абсолютное и относительное обилие снижается по мере нарастания аридности климата. В составе животного населения преобладают растительной почвы личинки жуков (Scarabaeidae, Tenebrionidae, Alleculidae) и хищные личинки двукрылых (Asilidae, Therevidae). Спектр экологических группировок представлен многочисленными луговыми и степными мезофилами (*Cardiophorus*, *Anomala dubia*, *Phyllopertha horticola*, *Ophonus punctuatus*, *O. puncticollis*, *Anisoplia austriaca*, *Dorcadion holosericeum*), типичными степными формами, связанными с корнями (*Crypticus quisquilius*, *Rhizotrogus aestivus*), политопными ксерофилами (*Pentodon idiota*, *Epicometis hirta*, *Blaps halophila*, *B. lethifera*, *Tentyria nomas*). В сухих степях на юге степной зоны средние показатели численности почвенной фауны составляют 100–140 экз./м<sup>2</sup>. Здесь в составе животного населения преобладают жуки-жужелицы, личинки чернотелок, долгоносиков, усачей. Типичные формы – личинки степных видов (*Agriotes gurgistanus*, *Selatosomus latus*, *Asida lutosa*, *B. lethifera*, *Opatrum sabulosum*). В дерновом горизонте многочисленны личинки *Dorcadion*. В пойменных хорошо увлажненных местообитаниях встречаются в большом количестве дождевые черви, многоножки, мокрицы. В типичных зональных группировках они отсутствуют.

В зоне полупустынь в полынно-злаковых ассоциациях преобладают пустынно-степные ксерофилы (*Harpalus amplicollis*, *Cymindis picta*, *Pimelia capito*). В песчаных почвах встречаются псаммофилы (*Scarites bucida*, *Amara fulva*, *Microdera convexa*). На солончаках и солонцах под солянковой и полынной растительностью встречаются специфические галофильные формы (*Pogonus punctulatus*, *P. transfuga*, *Cicindela atrata*, *C. contorta*, *Pogonistes* sp., *Tachus* sp., *Anisodactylus* sp. и др.).

**Региональные различия животного населения почвы.** Региональные различия состава животного населения в разных природных зонах исследованы на двух межзональных трансектах, пересекающих зону бореальных лесов на Русской равнине и Западно-Сибирской низменности [Стриганова, 1997]. На этой обширной равнинной территории с ярко выраженной зональностью почвенного и растительного покрова можно проследить влияние фактора континентальности на состав почвенной фауны и структуру зональных комплексов животного населения.



В южной тундре Европейской России почвенная фауна представляет собой обедненный вариант таежных сообществ. Здесь отсутствуют специфические северные формы и преобладают виды с широкими полизональными ареалами. В Западной Сибири в тундровой зоне большую роль играют субарктические виды, например, *Tipula carinifrons*, типичный евразийский вид, доминирующий в почвенных сообществах Северной Азии.

В северной европейской тайге преобладают личинки двукрылых из групп Nematocera Brachycera-Orthoptera. В зональных лесах Западной Сибири в почве наиболее многочисленной группой почвенной фауны являются гигрофильные кокциды, характерные для холодных заболоченных почв севера. Кокциды особенно многочисленны в зональных кедровниках. В средней тайге Русской равнины облигатным компонентом почвенной фауны становятся диплоподы Polyzoiiidae и некоторые виды кивсяков Julidae (*Rossiulus kessleri*, *Schizophyllum sabulosum*). Кивсяки, характерные для широколиственных и смешанных лесов, в тайге распространяются до северной подзоны, где встречаются в аazonальных прогреваемых местообитаниях. В тайге Западно-Сибирской низменности эта группа полностью отсутствует. Но на Средне-Сибирском нагорье диплоподы появляются снова под пологом зональных типов тайги.

Для групп педобионтов, общих для тайги обоих регионов, характерной особенностью является сдвиг северных пределов их распространения к югу по мере нарастания континентальности климата. Например, многоножки-геофилиды, обитающие в минеральной почве на Русской равнине, появляются уже в северной тайге, а в средней тайге они встречаются регулярно в почвенных пробах. В Западной Сибири представители этой группы отмечены только в подзоне южной тайги. Такая же тенденция отмечена для характерных таежных видов жуков-щелкунов (*Athous subfuscus*, виды *Agriotes*), и дождевых червей *Dendrobaena octaedra*.

Региональные различия наблюдаются и в структуре животного населения. В южной тайге Русской равнины обитатели минерального горизонта составляют более половины от общего обилия. Под пологом смешанных и широколиственных лесов лесостепи их доля еще более возрастает, а относительное обилие подстилочных форм снижается. Это определяется особенностями генезиса животного населения, приспособленного к регулярному дефициту влаги и высокой температуре подстилки в летний период. В южной тайге Западной Сибири доминирует комплекс подстилочных форм, а заселенность минерального горизонта не превышает 20–25 см глубины. При этом среди обитателей подстилки доминируют поверхностно обитающие хищники (Carabidae, Staphylinidae, Lithobiidae), способные к широким горизонтальным миграциям, что позволяет им перемещаться в точки с благоприятными гидротемическими условиями в летний жаркий период.

Трансектные исследования выявили и различия в расположении важнейших экотонных зон зонального ряда почв, где отмечены максимальные уровни обилия и разнообразия почвенных животных. На Русской равнине такой экотонной зоной является лесостепь. Там под пологом островных лесов и в лугово-степных местообитаниях животное население формируется за счет южно-таежных и степных элементов. Существенную часть почвенной фауны составляют представители своеобразной лесостепной группы видов. Эти формы в лесостепи встречаются и в островных лесах, и в остепненных местообитаниях, а за пределами зоны они приурочены лишь к аazonальным биотопам: в лесной зоне – к открытым местообитаниям, а в степи – к участкам с древесно-кустарниковой рас-

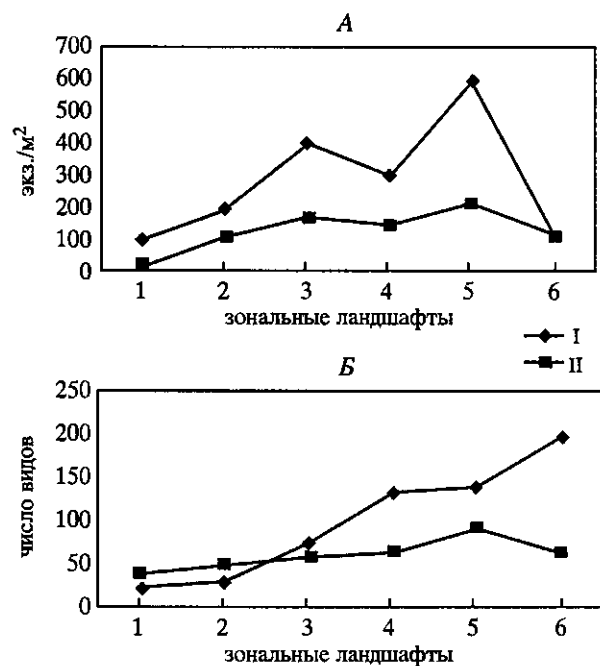


Рис. 22. Зонально-региональные различия обилия и таксономического богатства почвенной мезофауны  
 А – показатели максимального обилия; Б – видовое богатство мезофауны  
 Зональные ландшафты: 1 – южная тундра, 2 – лесотундра, 3 – северная тайга, 4 – средняя тайга, 5 – южная тайга, 6 – лесостепь  
 I – Европейский Российский трансект, II – Западно-Сибирский трансект

тительностью. В Западной Сибири максимум разнообразия животного населения отмечен в южной тайге, на территории, где уже исчезает многолетняя мерзлота, но под пологом леса отсутствует летний дефицит влаги в почве, характерный для сибирской лесостепной зоны. В южной тайге Западной Сибири на фоне преобладания таежных форм в составе почвенной фауны встречаются некоторые европейские виды, характерные для смешанных и широколиственных лесов Русской равнины. В мелколиственных лесах лесостепи они уже отсутствуют. Там животное население относительно обеднено, его состав формируется за счет таежных видов с широкой экологической валентностью и степных ксерофильных форм. Маргинальные черты лесостепных сообществ в Западной Сибири проявляются и в высокой степени мозаичности распределения отдельных групп почвенной фауны, определяющих резкие различия структуры локальных сообществ и низкую степень их устойчивости к резким колебаниям погодных условий отдельных лет. На рис. 22 показаны региональные различия показателей обилия и разнообразия почвенной фауны. От южной тундры до лесостепи общее обилие мезофауны в Европейской России выше, чем в Западной Сибири (рис. 22 А). Эти различия усиливаются к югу. По показателям таксономического богатства (рис. 2, Б), европейская фауна на севере более бедна, из-за отсутствия специфических тундровых видов и групп беспозвоночных. Но к югу таежной зоны ее разнообразие резко возрастает. В Западной Сибири максимум разнообразия отмечен в южно-таежной подзоне, южнее которой он снижается.

### Оценка роли животных в деструкционных процессах

Сапрофильный блок животного населения почв непосредственно участвует в деструкционном процессе, и особенности его структуры определяют функции животных в динамике разложения и минерализации растительных остатков в разных зональных типах почв. На рис. 23 показаны зональные различия обилия и структуры сапрофильного комплекса животных на широком спектре зональных ландшафтов от полярных пустынь до сухой степи [Стриганова, 1980]. Зоомасса почвенных беспозвоночных, непосредственно участвующих в детритных трофических цепях, колеблется от 3 до 60 г/м<sup>2</sup>. В структуре сапрофильного комплекса отмечены закономерные изменения в разных зональных ландшафтах. В полярной пустыне основу почвенного сапроблока составляют микробофаги и незначительную часть – потребители органического детрита, в котором они усваивают преимущественно микробную массу и клетки почвенных водорослей. В тундрах состав и обилие детритофагов расширяются наряду с существенным повышением абсолютного и относительного обилия группировки микробофагов. Далее, к югу зоомасса микробофагов поддерживается примерно на одном уровне, составляя 5–6 г/м<sup>2</sup>. Под пологом таежных лесов масса детритофагов увеличивается в четыре–пять раз за счет расширения участия дождевых червей в почвенных сообществах. Здесь, в зональных экосистемах появляется группировка первичных разрушителей подстилки, представленная диплоподами, мокрицами и подстилочными дождевыми червями. Эта группировка, связанная с листовой подстилкой, достигает максимального развития в смешанных и широ-

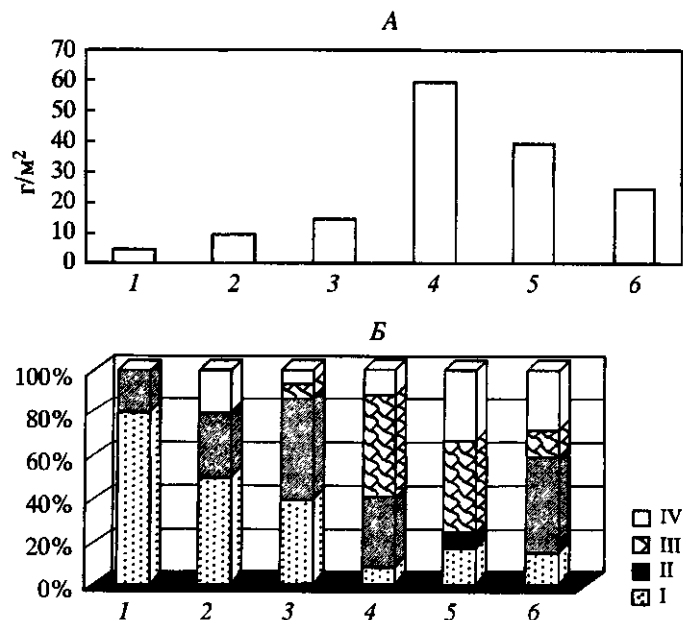


Рис. 23. Зональные различия обилия и структуры сапрофильного комплекса почвенных животных  
А – биомасса в почвах зональных ландшафтов, Б – структура сапрофильного комплекса беспозвоночных почв зональных ландшафтов.

Трофические группы сапрофильного комплекса: I – микробофаги,  
II – детритофаги, III – первичные разрушители, IV – миксофаги.

Зональные ландшафты: 1 – полярная пустыня, 2 – южная тундра, 3 – тайга, 4 – широколиственные леса (лесостепенные дубравы), 5 – луговые степи, 6 – полупустыня

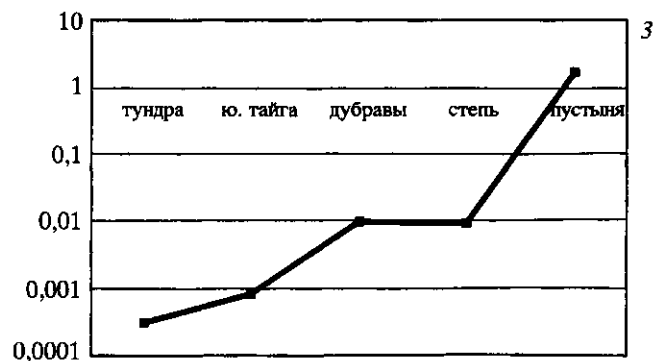
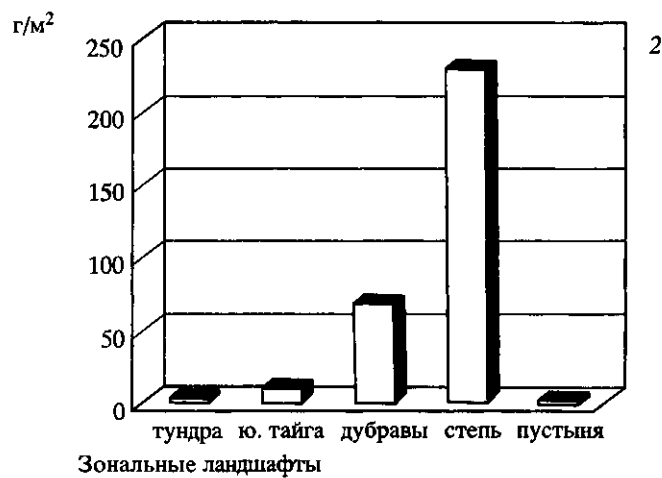
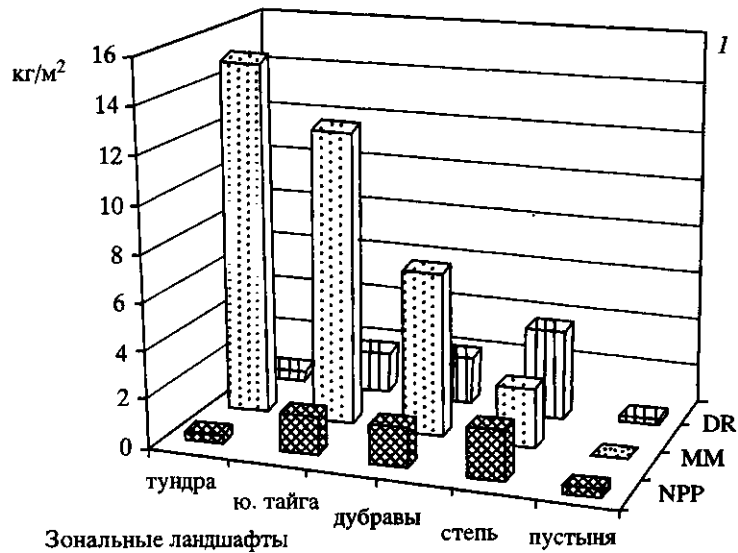


Рис. 24. Соотношения биопродукционных показателей и зоомассы в зональных типах почв  
 1 – зональные изменения величины первичной продукции (NPP), запаса мортмассы (MM) и скорости деструкции (DR); 2 – зональные изменения почвенной зоомассы; 3 – зональные изменения соотношения “зоомасса:мортмасса”

колиственных лесах, где животные включаются практически во все уровни детритных пищевых цепей. Зоогенная активность в этих сообществах играет большую роль в динамике деструкционных процессов, в значительной мере определяя темпы разложения растительных остатков и направление трансформации органического материала.

Южнее лесной зоны в травянистых местообитаниях в сообществах почвенных беспозвоночных расширяется значение фитофагов, связанных с корнями растений. Группировка первичных разрушителей в сухих степях практически исчезает, и в почвах аридных ландшафтов сапрофильные беспозвоночные представлены преимущественно глубокопочвенными детритофагами или формами со смешанным питанием, которые могут сочетать сапрофагию и питание живыми растительными тканями.

Общее обилие животного населения в почвах пустынной зоны резко снижается. На рис. 24 представлены интегрированные показатели, отражающие соотношение продукционно-деструкционных процессов в типичных зональных ландшафтах и демонстрирующие роль животных в деструкционной динамике [Striganova, 1991]. В зональном ряду от тундры до пустыни с севера на юг наблюдается увеличение годовой первичной продукции с максимумом в луговой степи и ее резкое снижение в аридной зоне (рис. 24, 1). Запасы мортмассы максимальны в тундре; к югу они снижаются за счет возрастания скорости разложения и минерализации растительных остатков. При этом скорость деструкции растительных остатков ( $\text{кг/м}^2/\text{год}$ ) в зональном ряду ландшафтов пропорциональна первичной продукции. Закономерности зональных изменений суммарной величины зоомассы в почве с максимумом в луговой степи сходны с динамикой продукционных и деструкционных процессов (рис. 24, 2). Но нагрузка животных на мортмассу имеет однонаправленную тенденцию увеличения с севера на юг. На графике (рис. 24, 3) представлена кривая изменения отношения зоомассы к мортмассе в логарифмической системе координат. Величина этого отношения плавно повышается от тундры до широколиственных лесов (лесостепные дубравы); на юге лесной зоны и в луговых степях это отношение практически одинаково, далее к югу оно резко возрастает. Таким образом, несмотря на существенное снижение абсолютной величины зоомассы в целом и сапрофильного комплекса, в частности, нагрузка животных на почвенную мортмассу в аридной зоне повышается почти на два порядка. Отсюда следует, что роль зоотических процессов в деструкционной динамике повышается от субарктического пояса к умеренному и достигает максимума в аридной зоне, где скорость процессов минерализации органических остатков максимальна.

### **Функциональная роль животных в почвенной динамике**

Участие животных в почвообразовательном процессе определяется их трофической и локомоторной активностью. Освоение животными почвенного яруса в процессе эволюции сопровождалось формированием в почве аэрированного пространства, обеспечивающего возможность существования в плотной среде аэриобионтных форм. Роющие беспозвоночные строят и поддерживают в почве систему макропор, регулируемую ее водно-воздушный режим. Дождевые черви и личинки насекомых, прокладывая ходы в почве, транслируют массу минерального материала, во много раз превышающую их собственную биомассу. Например, у пашенного червя *Aporrectodea caliginosa* суточный

поток почвы через кишечник составляет 176–192%, у *Nicodrilus jassiensis* – 217% [Стриганова, 1982; Стриганова, Логинова, 1987]. Дождевые черви в луговой почве увеличивают макропорозность верхнего гумусового горизонта в два раза, а минерального горизонта на глубине 30 см – в 1,3 раза.

Увеличение пористости почвы стимулирует лучший рост корней и способствует углублению аэробных микробиальных процессов. Кроме того, в процессе прокладки ходов животные заносят в глубокие горизонты органические остатки и увеличивают тем самым мощность гумусового слоя. Строя систему ходов, животные выбрасывают на поверхность значительную массу почвы. Объем выбросов дождевых червей, пустынных мокриц, муравьев, строящих подземные гнезда, сравним с величиной почвенной массы, поднимаемой на поверхность роющими позвоночными (кроты, суслики и др.). В поселениях пустынных мокриц *Hemilepistus cristatus* ежегодно выносятся из глубоких горизонтов на поверхность до 5,5 кг/м<sup>2</sup> почвы, обогащенной элементами питания. В процессе транслокации почвенной массы животные могут активно смещать положение солевого максимума в почвенном профиле и изменять гранулометрический состав почвы в обитаемом слое. Например, роющая деятельность термитов и муравьев в почвах аридных ландшафтов Центральной Азии приводит к увеличению содержания физической глины на 5–33%, что вызывает существенные сдвиги режима влажности почвы и динамики гумусообразования.

В процессе питания первичные и вторичные разрушители осуществляют размельчение растительного опада и распределение органических остатков по почвенному профилю. В их кишечнике идет частичное разложение клетчатки и разрушение лигно-целлюлозных комплексов. В экскрементах животных непрерывные остатки структурных компонентов растительных тканей обогащаются азотсодержащими продуктами обмена животных и в почве заселяются обильной микрофлорой, активность которой способствует быстрой минерализации органического материала. Трофическая активность животных также связана с формированием почвенных пор. Размельчение растительных тканей сапрофитами создает слой мелко диспергированного материала, агрегированного в копрогенные комочки и распределяемого по ходам животных. Увеличение суммы открытых поверхностей органических остатков при их измельчении в условиях достаточной аэрации и влажности стимулирует их заселение в почве микрофлорой и микрофауной.

Пищевая активность мелких почвенных животных-микробофагов и изъятие ими части микробной массы приводит к повышению микробной продукции и содействует ускорению микробных сукцессий в органических остатках, что способствует более быстрой и полной минерализации.

Важной стороной деятельности животных является перемешивание органического и минерального материала, что определяет их ведущую роль в формировании структуры гумусового горизонта. Животные создают поток копрогенных агрегатов, направленный с поверхности в глубину почвенного профиля, осуществляя механическое перемешивание минеральных и органических компонентов в процессе прокладывания почвенных ходов. Кроме того, в их кишечнике при формировании отдельных фекальных агрегатов имеет место реаранжировка органических и минеральных частиц: при резорбции воды перед выбрасыванием экскрементов в почву глинистые тонкие частицы располагаются на поверхности экскрементов и при высыхании образуют защитный слой, препятствующий испарению воды. Благодаря этому экскременты животных сохраняют повышенную влажность и частичную анаэробность и становятся локуса-

ми повышенной микробной активности и центрами новообразования гумусовых соединений в почве.

В природных экосистемах высокое обилие, разнообразие и активность животных коррелируют с высокими темпами деструкции, при этом трансформация органических остатков развивается по типу минерализации или гумификации. Напротив, низкое обилие и разнообразие животных и преобладание грибного разложения связано с трендом образования и аккумуляции торфа.

## Глава 9

### **ФУНКЦИИ ПОЧВ КАК ОСНОВНОГО ЗВЕНА В ЦИКЛЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА ВЕЩЕСТВ И УСТОЙЧИВОСТЬ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

#### **Введение**

В стабильности структуры и функционирования экосистем такие консервативные элементы, как коры выветривания и почвы имеют существенное значение. Основные тезисы, характеризующие роль почв в устойчивости экосистем могут быть сформулированы следующим образом:

1. Почвы повышают буферные возможности экосистем. Основную роль в поддержании устойчивости к техногенезу играют подстилка, органогенные и гумусово-аккумулятивные горизонты почв.

2. Стабильность почвенного покрова позволяет сохранять последовательное расположение элементов геосистем и экосистем, т.е. сохраняет их структуру как одно из условий устойчивости.

3. Устойчивость функционирования почв в системе мезо-, микро- и нанорельефа позволяет поддерживать биологическое разнообразие и стабильность динамических связей экосистем во времени.

Общеизвестно, что подстилка и верхние горизонты почв в значительной мере нейтрализуют или механически задерживают значительную часть поступающих на поверхность почвы с атмосферными осадками продуктов техногенеза разнообразного состава. Кроме того велика роль органогенных и гумусово-аккумулятивных горизонтов в физической устойчивости почв, экосистем и геосистем. Это и противоэрозийная стойкость почв, и устойчивость поверхности в области распространения многолетнемерзлых пород. Если, при разном рода нарушениях сохраняются хотя бы фрагменты этих горизонтов, то процессы восстановления растительного покрова и благоприятной среды для почвенной мезо- и микрофауны существенно ускоряются. При полной ликвидации этих горизонтов или профиля в целом восстановление экосистем естественным путем становится практически невозможным.

Мерой устойчивости экосистем по данным различных исследователей часто служит величина их продуктивности, которая в значительной мере определяется почвенными условиями. Сюда включается весь комплекс свойств, ответственных за корневое питание растений, защитные функции для корневых систем и почв, беспозвоночных и микроорганизмов, для которых почва является и средой обитания и источником пищи.

Так, по данным Л.Б. Холоповой и О.Н. Солнцевой [1986], в ельниках фитомасса напочвенного покрова в большей мере связана с влажностью и кислотно-

стью почв, чем с притоком солнечной радиации. И хотя в целом считается, что связь продуктивности травянистых растений с эдафическими условиями в два раза ниже, чем с солнечной радиацией, в ряде случаев именно почвенные свойства являются определяющими для прироста фитомассы трав.

Попытки найти интегральные показатели для математических моделей устойчивости экосистем привели к такому выводу, что ими могут служить запасы фитомассы, биологическая продуктивность, баланс органического вещества и энергии, характер биогеохимического круговорота. Так показателями нормального функционирования почвы, как биокосной системы является биологическая продуктивность и качество растительной продукции [Глазовская, 1997]: 1) уровень продукции не должен изменяться; 2) в биомассе не должны накапливаться элементы и их соединения в количествах, нарушающих функции БГЦ; 3) в почвенной среде должен сохраняться средообразующий фонд, поддерживающий устойчивость почвы как биокосной системы.

Длительное и стабильное функционирование наземных экосистем – признак стабильности данного типа биосферы. В свою очередь почва, как один из важнейших компонентов экосистем, обуславливает эту устойчивость на разных уровнях организации биосферы. Рассматривая один из важнейших вопросов строения и функционирования биосферы, В.И. Вернадский определил механизм, с помощью которого регулируется относительное равновесие в пределах земных оболочек. Он писал, что в биосфере “между ее косной безжизненной частью, ее косными природными телами и живыми веществами, ее населяющими идет непрерывный материальный и энергетический обмен, материально выражающийся в движении атомов, вызванном живым веществом. Этот обмен в ходе времени выражается закономерно меняющимся, непрерывно стремящимся к устойчивости равновесием. Оно проникает всю биосферу, и этот биогенный ток атомов в значительной степени ее создает” [Вернадский, 1977]. Таким образом, В.И. Вернадский видел в биологическом круговороте веществ основной механизм не только устойчивости биосферы, но и самого ее существования.

В процессе эволюции Земли и ее оболочек круговорот изменялся от чисто абиотического характера к биогеохимическому. Одновременно шла качественная и количественная перестройка структурных составляющих круговорота. Изменялось количество и соотношение элементов, захваченных живыми организмами, изменялись скорости круговорота, обусловленные, например появлением покрытосемянных растений и млекопитающих в середине мелового периода. Эволюция биосферы сопровождалась усилением роли гетеротрофов, занявших свое место в трофических звеньях и обеспечивших деструкцию мертвого органического вещества. Не случайно разделение живых организмов по типам питания признано В.И. Вернадским в числе фундаментальных открытий XIX в. Эта концепция лежит в основе современной экологии.

Совершенствование соотношения автотрофов и гетеротрофов привело к относительно замкнутому круговороту. Появление автотрофов обусловило разделение среды на резко окислительную и восстановительную, что увеличило разнообразие путей и форм миграции элементов.

Глобальные последствия круговорота веществ привели к целому ряду важнейших изменений на Земле. В их числе следует назвать вывод из круговорота громадного количества углерода, благодаря чему сформировались современные оболочки Земли, и круговорот стал биогеохимическим. Изменился состав осадочных пород с тенденцией к увеличению доли оксидных соединений железа и содержания калия и кальция. Эволюция экосистем сопровождалась увеличением биоразнообразия на земной поверхности. Эти глобальные изменения



привели к развитию почвенного покрова, как одного из важнейших компонентов земной оболочки и одного из механизмов, обеспечивающих круговорот на Земле.

В силу этого обстоятельства становится понятным то огромное внимание, которое уделяется роли биологического круговорота веществ в различных естественных дисциплинах от теории литогенеза осадочных пород и выветривания [Страхов, 1962; Черняховский, 1991] до экологии [Одум, 1986] и фитоценологии. Нельзя не отметить, что закон биологического круговорота по определению А.И. Перельмана [1989] является одним из важнейших законов геохимии ландшафта, так как именно почва обуславливает и создает условия для цикличности и определенной направленности в изменении соотношений важнейших биофильных элементов.

Учение о биологическом круговороте элементов служит фундаментальным разделом современного почвоведения, основы которого заложены в трудах В.В. Докучаева, В.И. Вернадского, Б.Б. Польшова, В.В. Сукачева. Становление основных принципов биологического круговорота связано с именами многих русских почвоведов. Среди них особое место принадлежит В.Р. Вильямсу.

П.С. Коссович одним из первых опубликовал работу, особенно актуальную сегодня [1913].

Исследование генезиса почв, их истории и развития требует не только сопоставления физико-химических свойств, но и анализа особенностей биологического круговорота. Об этом писал в 1913 г. еще П.С. Коссович, отмечавший, что "...познание путей передвижения каждого из элементов необходимо, как для понимания вообще вопросов развития земной коры, так и, в частности, для уяснения целого ряда почвообразовательных процессов. А поэтому изучение круговорота (передвижения, блуждания) каждого элемента земной коры должно составлять одну из наиболее существенных и ближайших задач геологии и почвоведения". И далее этот же ученый отмечал, что "...наши сведения в этом направлении весьма скудны" [Коссович, 1913].

Несколько позднее в 1914 г. В.Р. Вильямс подчеркивал значение корневого питания не только как физиологического, но и как почвенного процесса. Б.Б. Польшов [1956], формулируя задачи почвоведения, отводил круговороту ведущую роль, рассматривая почвообразование "как сочетание циклов", особо отметив, что "почвоведение без круговорота не могло бы решить проблемы плодородия". В.А. Ковда [1984], развивая идеи В.И. Вернадского и Б.Б. Польшова, писал, что существующий почвенный покров следует рассматривать как результат сочетания прошлых биогеохимических циклов. Однако не только цикличность является характерной чертой круговорота, но и определенная направленность этого явления. Работы, проводимые в Московском университете под руководством Н.П. Ремезова и в Англии Овингтоном [1956–1960], имели огромное значение для развития методологии и теории биологического круговорота.

Изучению биологического круговорота посвящены работы крупнейших геохимиков: В.В. Виноградова, В.В. Ковальского, М.А. Глазовской, А.И. Перельмана, А.Л. Ковалевского и многих других. Труды В.А. Ковды, Н.И. Базилевич, Л.Е. Родина, С.В. Зонна, Н.Н. Большева, А.А. Молчанова, В.Н. Минц, Т.А. Работнова, А.А. Титляновой, Л.А. Гришиной, Т.И. Евдокимовой, Е.М. Самойловой и других являются основополагающими в области биологического круговорота. Особое место в современных исследованиях принадлежит разработке математических моделей циклов элементов. Среди ведущих следует назвать работы: А.А. Ляпунова, А.А. Титляновой, Ю.М. Свирежева, В.Ф. Крапивина, Т.Г. Гильманова, И.М. Рыжовой. Фундаментальные проблемы биологиче-

ского круговорота особенно детально освещены в работах Н.И. Базилевич и Л.И. Родина [1965]. Им принадлежит не только обобщение большого фактического материала по продуктивности, географическим закономерностям биологического круговорота и его химизму, но и создание одной из современных систематик круговорота.

### **Определение и основные параметры биологического круговорота**

Круговорот общее понятие, обозначающее циркуляцию органического вещества, элементов или энергии в естественных или искусственных экосистемах. Под биологическим круговоротом [Родин и др., 1968] понимается поступление элементов из атмосферы и почвы в живые организмы, биохимический синтез и закрепление химических элементов в органическом веществе растений и возвращение их в почву и атмосферу с ежегодным спадом части органического вещества или с полностью отмершими организмами, входящими в состав биогеоценоза. По А.А. Титляновой [1984] круговорот представляет собой совокупность биотических процессов, а к абиотическим она относит, например, поступление элементов с атмосферными осадками и почвенными водами.

Согласно Ю. Одуму [1986] в круговороте различают два фонда: резервный – большая масса медленно движущихся веществ, преимущественно заключающихся в небиологических объектах, и подвижный, или обменный, фонд – меньший, но более активный, для которого характерен быстрый обмен между организмами и окружающей их средой.

Кроме общего понятия круговорота используется ряд других понятий, таких как обмен веществ, циклы и другие. За немногим исключением в основе большинства терминов лежит “биогенный ток” элементов по В.И. Вернадскому, который наблюдается между живым веществом и косной материей. По мере развития БГЦ происходит не только усложнение связей между их компонентами, но и возникновение новых элементов в экосистеме. Образуется детрит, включающий подстилку, гумус, другую мортмассу, а также формируются органоминеральные соединения.

В широком понимании биогеохимический круговорот обозначает совокупное действие биогенных и абиогенных процессов. Синонимами этого понятия являются биогеохимические циклы, биогеохимическая миграция. Согласно Ю. Одуму, биогеохимические циклы разделяются на два типа: круговорот газообразных веществ с резервным фондом в атмосфере или гидросфере; осадочный цикл с резервным фондом в земной коре.

Рост живых организмов увеличивает время пребывания элементов в трофических звеньях, а образование детрита приводит к тому, что живые организмы поглощают элементы не только из минеральной части почвы. Причем в отдельных случаях потребление элементов из детрита достигает значительных величин. Так, поступление некоторых элементов из подстилки в древесный ярус в сосновых насаждениях составляет иногда до 70% от их общего потребления.

Рассматривая круговорот, нельзя не учитывать времени, в течение которого элемент передвигается внутри живых организмов, в частности, в растениях. Установлено, что в некоторых случаях элемент передвигается по поверхности корневых систем.

Иерархия круговоротов, по В.В. Снакину [1987], включает три важнейших типа: биологический, геологический и биогенный. Если биологический круго-

ворот протекает на уровне живых организмов, то биогенный представляет собой совокупность процессов, происходящих в пределах БГЦ (биогеоценотический); между сопряженными единым циклом миграции БГЦ (биогеохимический), геохимических ландшафтов (геохимический круговорот). Таким образом, этот подход подробно описывает круговорот в ряду живые организмы–биогеоценоз – геохимический ландшафт.

Фундаментом современного учения о биологическом круговороте служат несколько важнейших концепций:

1. Концепция биосферы, о которой уже говорилось выше.
2. Концепция биогеоценозов (экосистем), раскрывающая структурно-функциональную организацию наземных и водных БГЦ, в основе разделения которых лежит единство превращения вещества и энергии.
3. Концепция геологической роли живых организмов, подчеркивающая незаменимость роли живых организмов в химическом становлении современных оболочек Земли. В рамках этой концепции важно подчеркнуть огромное значение живых организмов в осадконакоплении в условиях наземных и водных бассейнов [Страхов, 1962].
4. Концепция системного подхода. Она предусматривает: а) методологический подход к изучению БГЦ; б) выделение БГЦ, как единиц исследования; в) расчленение на компоненты; г) установление внутренних связей; д) установление внешних связей. Очевидно, что идеи системного анализа незаменимы при современном уровне исследования биологического круговорота.

### **Основные показатели биологического круговорота**

Основные показатели биологического круговорота подразделяются на три группы. Первая группа объединяет те из них, которые характеризуют продуктивность наземных экосистем. Эти показатели относятся к числу фундаментальных и только на их основании можно составить представление не только о структуре и функционировании наземных экосистем, но и о направленности биологического круговорота. Согласно А.А. Храмову [1970], продуктивность – это способность живых организмов создавать, трансформировать и консервировать органическое вещество. Не случайно биологической продуктивности уделяется большое внимание при исследовании наземных экосистем. Установлено, что значительная часть солнечной энергии расходуется на транспирацию, и только от 0,8–1,0% – на фотосинтез (табл. 23). При этом важно отметить, что для экваториальных обществ КПД ФАР наибольший, с наименьшими величинами для пустынных и поллярных областей.

Многими исследованиями показано, что продуктивность обусловлена такими факторами как радиационный баланс и радиационный индекс сухости. В частности, А.В. Дроздову [1969] удалось показать, что при радиационном балансе до 40 ккал/см в год продуктивность обусловлена недостатком тепла, а после этой величины в большей степени определяется увлажнением. Важно отметить, что большая часть солнечной энергии, поступающей на земную поверхность, приходится на аридные территории. Детальное исследование зональных и гидроморфных экосистем показывает, что по мере возрастания радиационного баланса размер продукции возрастает. Вместе с тем в этом же направлении увеличивается различие в продукции автоморфных и гидроморфных ландшафтов. Наибольшая близость продукции сравниваемых групп экосистем отмечена в хо-

Показатели продуктивности некоторых зональных растительных сообществ

Показатель	Пятнистые дриадово-мо- ховые тундры (Таймыр)	Ельники Вал- дая (80 лет)	Луговая степь (Тамбовская низменность)
Фитомасса, г/м <sup>2</sup> сухого вещества	1958	36400	2530
Продуктивность, г/м <sup>2</sup> в сутки	0,4	4,6	2,9
Опад, г/м <sup>2</sup>	9	612	1060
Подстилки; опад зеленой массы	13	6	1
Надземная фитомасса; подземная фитомасса	0,12	4,0	0,17
Фотосинтезирующая масса; нефотосинтези- рующая масса	0,04	0,02	0,15
Фотосинтезирующая часть прироста; не- фотосинтезирующая часть прироста	0,17	0,30	0,45

лодных областях полярных регионов (рис. 25). Придавая исключительно большое внимание величинам продуктивности, А.И. Перельман использовал эти показатели в целях классификации ландшафтов.

Вторая группа показателей, которые широко используются при характеристике биологического круговорота – это данные о химическом составе живых организмов. При всем широком разнообразии химического состава существуют общие закономерности его формирования. В работах А.П. Виноградова [1932] подчеркивается, что химический состав живых организмов, особенно это касается макроэлементов, определяется их эволюционным происхождением.

Что касается микроэлементов, то их содержание в большей степени определяется геохимическими особенностями территории. Тиссен [1954] показал, что элементы, которые наиболее часто встречаются в минералах, активно участвуют в построении живого вещества. Интересные закономерности установлены А.Е. Ферсманом [1958], который считал, что в периодической системе Д.И. Менделеева существует поле жизни, располагающееся в пределах от углерода до аргона. Особая роль принадлежит организмам концентраторам, которые поддерживают круговорот особенно редких элементов. В связи с этим тип химизма является основополагающим при установлении взаимодействия живых организмов и других компонентов биосферы.

При изучении биологического круговорота существенное значение уделяется таким важнейшим макроэлементам как кальций, магний, кремний и ряд других. Особенно важное значение принадлежит азоту. В зависимости от типа фитоценоза химический состав растений может значительно различаться (табл. 24). Содержание важнейших макроэлементов самым тесным образом связано со свойствами почв и общим уровнем трофности наземных экосистем. Для растений формирующихся в олиготрофных, особенно в северных условиях, свойственно преобладание азота над основными зольными элементами. Вместе с тем отметим, что если почвы северных широт формируются на породах насыщенных основаниями, то растения, произрастающие в этих условиях могут интенсивно накапливать такие элементы как кальций, магний и другие. Высокие концентрации щелочных и щелочно-земельных элементов обнаруживаются в растениях пустынных сообществ, где общая сумма элементов, включая азот, составляет 10–20% и более (табл. 25).

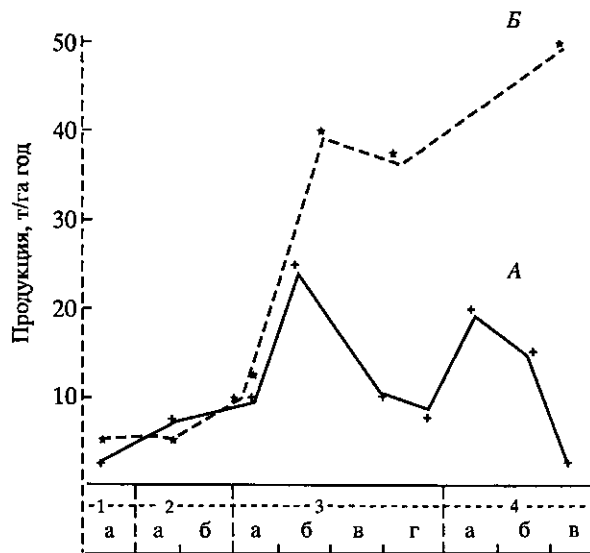


Рис. 25. Продукция автоморфных зональных и гидроморфных экосистем различных термических поясов РФ и СНГ

Пояс и экосистемы: 1 – полярный: а – тундры; 2 – бореальный: а – темнохвойные леса, б-хвойно-широколиственные леса; 3 – суббореальный: а – широколиственные леса, б – луговые и настоящие степи, в – сухие степи, г – пустыни; 4 – субтропический: а – широколиственные леса, б – ксерофитные леса и редколесья, в – пустыни; А – экосистемы авто-морфные зональные; Б – то же гидроморфные экосистемы [Базилевич и др., 1986]

Элементы, аккумулирующиеся в биомассе, затем частично поступают с наземным опадом в почву, но судьба этих элементов различна. Одни элементы, характеризующиеся высокой миграционной способностью, быстро выщелачиваются, другие поглощаются растениями вторично. Элементы третьей группы могут необменно поглощаться почвами.

Третья группа показателей круговорота может быть основана на энергетических величинах. Расчеты показывают, что во всей биомассе суши [Исаченко, 1991] заключено около  $4 \times 10^{16}$  МДж. Максимальные величины сосредоточены в экваториальных и североамериканских лесах из секвойи и пихты Дугласа, где эти величины, соответственно, составляют от 800 до 1700 МДж/м. В таежных лесах эти показатели снижаются до 500 МДж/м, а в широколиственных лесах возрастают до 650 МДж/м. Обращает на себя внимание, что эти величины вполне сопоставимы с тем количеством, которое аккумулируется в гумусе почв. В частности, в типичных черноземах сосредоточено около 1000 МДж/м, значительно больше сосредоточено потенциальной энергии в торфах. Так, около 30% от мировых запасов энергии, сосредоточенных в торфах, приходится на торфяные экосистемы России.

Обращая внимание на запасы углерода в фитомассе и почвенной сфере, Г.А. Заварзин [1985] подсчитал, что в общем запасе углерода на планете, сосредоточенного в фитомассе и составляющего  $800 \times 10^{18}$  г и углерода гумуса, запасы которого достигают  $1700 \times 10^{18}$  г, тропические леса и таежные экосистемы дают близкие величины, около  $270 \times 10^{18}$  г.

Учитывая, что процессы преобразования энергии в наземных экосистемах касаются всех блоков экосистем, В.Р. Волубуев [1974] использовал при расчетах затрат энергии на почвообразование, кроме радиационного баланса и коэф-

Таблица 24

**Химический состав биомассы, % на сухое вещество  
[Гришина и др., 1976]**

Объект исследования	Ярус	N	P	S	Si	K	Na
Дриадово-моховая тундра, (Таймыр)	1	0,56	0,09	0,04	0,54	0,48	0,05
	2	0,90	0,08	0,20	0,56	0,14	0,06
Ельник кисличник (Валдай)	1	1,17	0,04	0,004	0,09	0,13	н/о
	2	0,45	0,08	0,07	0,02	0,02	н/о
Разнотравно-костровое сообщество	1	2,59	0,13	0,21	2,04	1,70	0,14
	2	2,24	0,10	0,31	1,73	0,24	0,11
Полынно-типчаковое сообщество (Тамбов)	1	2,36	0,09	0,29	2,14	1,90	0,17
	2	2,30	0,17	0,60	2,71	0,21	0,21
Влажно-тропические леса	1	2,25	0,17	0,18	1,10	0,95	0,05
	2	0,65	0,08	0,25	0,30	0,45	0,02
Галофитный луг (солянки, Копет-Даг)	1	1,61	0,04	0,52	0,44	0,70	5,90
	2	0,99	0,02	0,17	0,22	0,71	1,04

*Примечание:* 1 – наземная, 2 – подземная части; во влажных тропических лесах: 1 – листья, 2 – корни

Таблица 25

**Минеральный состав различных групп растений суши**

Группа	Среднее содержание, кг/га	Годичный оборот	Преобладают
Хвойные	3–7	100–300	Si, Ca, P, Mg, K
Лиственные	5–10	460–850	Ca, K, P, Al, Si
Травяные	5–7	800–1200	Si, Ca, K, S, P
Тропические	3–4	1000–2000	Ca, K, Mg, Al
Галофиты аридных областей	20–45	500–1000	Cl, S, Na, Mg, K

фициента увлажнения, количество энергии ежегодно накапливаемой в годичном приросте. В ландшафтоведении при оценке интенсивности функционирования ландшафта исключительное значение придается внутреннему обороту веществ и связанной с ним величине биологической продуктивности [Исаченко, 1981]. Установлено, что затраты энергии на эвапотранспирацию, величина чистой первичной продукции и годовое потребление зольных элементов и азота находятся в самой тесной корреляции между собой. Предполагается, что потенциальные скорости разложения по некоторым данным связаны с запасами энергии в растительных остатках [Грищенко, 1981], что обусловлено в первую очередь соотношением в них жиров, белков и углеводов.

### Классификация круговоротов

Заключительным этапом при изучении биологического круговорота (БИК) является классификация, которая сводится к упорядочению полученного материала, определению специфики происходящих в БИК процессов и последующему установлению характерных особенностей циклов внутри од-

**Некоторые количественные характеристики структуры  
и функционирования семейств наземных экосистем  
[Н.И. Базилевич и др., 1986]**

Область, се- мейства экосистем	Запасы, т/га		Продукция	Рот В %	М/Р
	фито	мор			
<b>Полярный пояс</b>					
Гумидные					
<b>Бореальный пояс</b>					
Гумидные и семиаридные	75–360	20–70	4–16	3–5	5–9
<b>Суббореальный пояс</b>					
Гумидные ши- роколиствен- ные леса	250–600	50–100	10–16	3–4	4–6
Семиаридные степи луговые	8–35	10–40	8–35	100–125	0,8–1,4
<b>Субтропический пояс</b>					
Гумидные	250	25	17	5–6	1,5
<b>Суббореальный и субтропичес- кий пояса</b>					
Аридные такы- ры солончаки	0,7 1,5; 1,5–22	0,4 0,7; 1–25	0,9 2,3; 0,5	60 300; 20–100	0,1 0,3; 0,3–7

ной почвенно-биоклиматической зоны или сопоставлению экосистем в зональном аспекте.

Все разнообразные классификации учитывают положение изученного БГЦ в системе почвенно-биоклиматических зон. Вторая особенность классификаций состоит в том, что критерии для классификации выбираются на эмпирической основе. Несомненно, что большинство из них важные, но являются ли они существенными, т.е. достаточными, чтобы отличать БГЦ друг от друга, не всегда ясно. Некоторые показатели БИКа для различных географических зон перекрываются.

Наиболее широко используемой группой являются данные по продуктивности. Придавая исключительную роль показателям продуктивности, Н.И. Базилевич [1986] использовала их для оценки структуры и функции наземных экосистем (табл. 26).

Из-за зависимости этих показателей от гидротермического режима, группировка зональных экосистем в таксоны высокого ранга осуществляется в пределах биоклиматических областей одного термического пояса. Для характеристики структуры семейств экосистем используются два критерия: запасы живой фитомассы и запасы мертвой массы, без учета гумуса и торфа.

Для оценки функционирования экосистем применяют три показателя: первичную продукцию; долю первичной продукции от общих запасов фитомассы; отношение мертвой органической массы к первичной продукции.

Основные закономерности структуры экосистем и функционирования сводятся к следующим положениям:

1) изменение величины годичной продукции экосистем по зонам описывается двухвершинной кривой (см. рис. 25); 2) для интразональных переувлажненных экосистем с севера на юг наблюдается непрерывное возрастание величины годичной продукции; 3) отношение мортмассы к годичной продукции подчинено строгой закономерности, включая зональные и интразональные экосистемы; 4) наибольшие скорости оборота характеризуют экосистемы суббореального и субтропического поясов, что связано прежде всего с тепловым балансом земной поверхности.

Показатели продуктивности положены в основу классификации ландшафтов. Так А.И. Перельман [1989] использует два критерия: биомассу и продуктивность. Таксономия классификации включает группы, типы, семейства. Группы ландшафтов определяются по принадлежности к зоне (тундровая, лесная, степная и т.д.). В ряде случаев выделение групп обусловлено другими факторами, включая позональное их размещение (например, верховые болота в таежной зоне, соровые солончаки в пустынной и т.д.).

В основу выделения типа биогенного ландшафта положен коэффициент  $k$ , выводимый из параболической зависимости  $P = BK$ , где  $P$  – ежегодная продукция,  $B$  – общая биомасса. Для таежной зоны  $k = 0,54–0,55$ ; для широколиственных лесов –  $0,58–0,60$ ; для влажных степей –  $0,81$ . Коэффициент  $k$  постоянен при различных величинах  $P$  и  $B$ . Тип ландшафта в целом соответствует типам растительного покрова. Внутри ландшафтов, характеризующихся различными биомассой и продукцией, но близким соотношением между ними, выраженным коэффициентом  $k$  ( $P/B$ ), выделяют три семейства. Например, в пределах таежной зоны выделяются северное, среднее и южное, в типе сухих степей – северное семейство на темно-каштановых почвах и южное – на светло-каштановых. Критерии выделения семейств подлежат уточнению. Как видим, на низких таксономических рангах отмечается корреляция с подтипами почв.

Специфическая классификация типов круговорота веществ предложена С.В. Зонном [1964] для подразделения почв лесных БГЦ на группы, ряды и типы. Группы типов выделяются по накоплению органического вещества, определяемому различным составом растительности. Ряды типов группируются по формам поступления и движения материи, с которой связана миграция элементов в системе живые организмы – почва. На уровне типов учитывается характер круговорота атмосферных и земных элементов, связанный со скоростью разложения органических остатков и с типами водного режима.

Например, группы типов: лесотундровые, таежно-лесные, южно-таежные (хвойно-широколиственные), лесостепные, степные, полупустынные, пустынные, тропические и субтропические. В пределах каждой группы типов лесные почвы подразделяются на три ряда: биологический, биогенно-вулканический, биогенно-аккумулятивный.

М.А. Глазовская [1974], рассматривая процессы изменения взаимоотношений между растительностью и почвой, предложила выделять различные типы круговорота. Первый тип назван заторможенным некомпенсированным, когда элемент однократно участвует в биологическом круговороте (БИКе), а все количество биологически захваченного и возвращаемого при отмирании организмов элемента находится в недоступных формах, исключается из БИКа и накапливается в почве или на поверхности. Такая ситуация свойственна при интенсивном торфообразовании, которое протекает при заболачивании водоемов или



суши. В обоих случаях это сопровождается сукцессионными явлениями и, как следствие, изменением типов круговорота.

Второй тип – это интенсивный компенсированный круговорот, когда элемент многократно участвует в БИКе вследствие быстрого освобождения из мертвых остатков и перехода в доступное состояние. Возможные изменения емкости БИКа сводятся к следующим фазам:

1) фаза превращения породы в почву (емкость круговорота увеличивается, элемент накапливается в живом веществе); 2) фаза стационарного почвенного процесса при относительно постоянной высокой емкости БИКа (элемент находится, главным образом, в живом веществе, активное биогенное накопление в почве невозможно, так как для элемента характерны доступные для организмов формы); 3) фаза нестационарного почвенного процесса при уменьшающейся емкости БИКа (уменьшение захвата элемента организмами и его накопление в почвах); 4) фаза стационарного почвенного процесса при суженном БИКе (запас накопленного биогенным путем элемента остается постоянным); 5) фаза нестационарного почвенного процесса при вновь увеличивающейся емкости БИКа (уменьшение биогенных запасов элемента в почве и все большее накопление его в живом веществе).

Таким образом, почвообразование характеризуется определенной циклическостью, которая проявляется, по В.Р. Вильямсу, в форме непрерывного процесса группировки минеральных элементов в новые формы органического вещества и в последующей перегруппировке их в формы минерального вещества. Основная причина такой циклическости, по его мнению, заложена в количественной ограниченности зольных элементов.

В детальной и получившей наибольшую известность классификации круговорота элементов Н.И. Базилевич [1965] используется шесть признаков: 1) принадлежность БГЦ той или иной зональной единице; 2) показатели структуры фитомассы: а) биомасса растений, б) годичный прирост, в) спад, г) истинный прирост, д) подстилка; 3) показатели интенсивности круговорота, устанавливаемые по отношению величины запаса подстилки к величине опада; 4) характер сочетаний химических элементов, потребляемых на построение годичного прироста или возвращаемых с годичным приростом. Типизацию химизма обменных процессов производят по двум ведущим элементам с указанием сопутствующих элементов. Группы типов химизма обменных процессов объединяют в классы по одному преобладающему элементу; 5) величина средней зольности прироста – спада оценивается по средневзвешенному содержанию зольных элементов в 100 г прироста – спада (в %); 6) показатели емкости БИКа оцениваются по величине ежегодно потребляемых на построение прироста (возвращаемых с спадом) зольных элементов и азота (в кг/га). В целях унификации принята десятибалльная шкала числовых показателей.

Высшим таксоном классификации является класс типа круговорота веществ, характеризуемый преобладающим элементом в годичном приросте с указанием принадлежности БГЦ к биоклиматическому поясу. В пределах класса выделяют группы по показателям, указанным выше. Например, класс азотный, бореальный; группы: азотные тундровые, низкозольные, очень малопродуктивные, застойные; элементы: К, Mg (табл. 27).

Весьма сложным является вопрос о зональности круговорота. Если следовать классификации Н.И. Базилевич, в основе которой изначально заложен критерий зональности, то надо ответить положительно. Если рассматривать конкретные данные по биологическому круговороту, то окажется, что часть

Классификация типов круговорота (фрагмент) [Родина, Базилевич, 1965]

Класс	Группы типов круговорота	Растительность
Азотный	Азотные, тундровые, низкозольные	Тундры
Кальциевый	Азотно-кальциевые широколиственных	Дубравы
Кремниевый	Азотно-кремниевые влажных тропических лесов, среднезольные	Влажные тропические леса

показателей для различных зон будут близки, причем это касается не только величин продуктивности и функционирования наземных экосистем, но и ряда параметров круговорота, характеризующих поведение отдельных элементов. Например, Т.Г. Гильмановым [1986] установлено, что индекс цикличности углерода для мохово-кустарничковой тундры составляет величину 0,754, а для луговой степи – 0,703, что связано с более высоким уровнем замкнутости круговорота в условиях тундровых ландшафтов.

Объяснение этого явления заключается в том, что в тундровых экосистемах уровень вторичного использования углекислого газа, выделяемого растениями гораздо выше по сравнению с луговыми фитоценозами. Однако близость показателей БИКа разных экосистем связана и с другими причинами.

Среди них следует назвать несколько. Одна заключается в эмпирическом подборе признаков, которые являются, вероятно, чаще диагностическими, чем существенными. Во-вторых, суждение о зональности круговорота основано на сопоставлении отдельно исследованных, часто случайно выбранных экосистем, а не на анализе средневзвешенных показателей, характеризующих круговорот в пределах географической зоны и рассчитанных с учетом вклада всех слагающих ее биогеоценозов. Третья причина заключается в том, что показатели круговорота получены преимущественно на основе однократного взятия биомассы и гораздо реже методом динамического учета или способом расчета интенсивностей потоков. Между тем, результаты, полученные этими методами, серьезно различаются. И, наконец, большинство исследований круговорота касаются преимущественно установления роли растительности, и в меньшей степени связаны с изучением вклада позвоночных и беспозвоночных животных, входящих в зоомикробное сообщество. Очевидно, что прямое отождествление химического состава биомассы в широком смысле этого слова только с химическим составом растительности является некорректным. Дальнейшие пути развития и создания классификаций круговорота должны основываться не только на расширении числа диагностических признаков, что само по себе вполне нормальное явление, но и на поиске немногих по численности, но важнейших по существу. В этом отношении далеко не полностью использованы методы численных формальных классификаций, например, дискриминантного анализа.

Данные Н.И. Базилевич и Л.Е. Родина [1960] показывают, что на земном шаре с учетом преобладания важнейших элементов в биологическом круговороте можно выделить по крайней мере четыре группы, образующие соответствующие классы типов круговорота: экосистемы с преобладанием в круговороте азота (тундры, хвойные и лиственные леса умеренного пояса, субтропические леса); экосистемы, в которых велико значение кальция (широколиственные леса умеренного пояса, полукустарничковые пустыни); экосистемы с повышенной ролью в круговороте кремния (степи, саванны, эфемерно-полукустар-

ничковые пустыни, а также влажные тропические леса); сообщества в круговороте которых велико значение хлора – солончаки. Внутри каждой группы существуют особенности круговорота, определяемые характером функционирования конкретной экосистемы.

Наибольшее разнообразие характерно для азотного типа круговорота – 13 типов. На втором месте стоит кремневый тип круговорота – семь типов химизма, затем кальциевый тип – три типа химизма и хлоридный – два типа. Во-вторых, в северном полушарии при абсолютном преобладании азотных типов круговорота, встречаются и все другие группы.

Расчеты территориальной распространенности типов круговорота по континентам с использованием карты сделала Н.И. Базилевич. Она показала, что азотный тип круговорота преобладает в наземных экосистемах суши, за ним следует кремневый и кальциевый. Вместе с тем обнаруживается дифференциация типов круговорота по континентам. Так, азотный тип круговорота в наибольшей степени характерен для Северной Америки и Азии и меньше распространен в Австралии и Африке. Кальциевый тип круговорота преобладает на европейском континенте и в Австралии. Однако для последнего континента кроме этого характерно широкое распространение и кремневого типа круговорота.

Таким образом, азотные типы круговорота преимущественно тяготеют к северным широтам (тундровым, таежным и хвойно-широколиственным ландшафтам), кремневый тип к экваториальным лесам, а в умеренном поясе – к степным экосистемам. Отмечается тесная корреляция кремниевого типа круговорота с территориями Южной Америки и африканским континентом. В целом незначительны по площади территории с преобладанием в круговороте хлора. В основном это территории азиатской части Евразии.

Интересно сопоставление элементов, преобладающих в круговороте, и ионного состава материковых вод. Так, в водах европейского материка преобладают ионы карбонатный и кальция.

Для состава вод южноамериканского континента характерна почти равная доля участия в их составе ионов кальция и кремния при значительной роли последнего в общем круговороте элементов. Близкая картина наблюдается для африканского континента.

Несколько более сложной оказалась связь между типом круговорота и почвенным покровом. На евразийском континенте преобладают кислые и слабокислые почвы бореального пояса (12,9%), а также нейтральные и слабощелочные степные (9,7%). Более незначительна роль аллитных и ферралитных кислых почв влажных тропиков (6,3%). На североамериканском континенте резко увеличена роль кислых и слабокислых почв бореального пояса (22,1%), при близкой к евразийскому континенту доли нейтральных и слабощелочных степных почв (9,6%), однако роль аллитных и ферралитных почв влажных тропиков снижена до 2%.

Несколько лучше прослеживается связь между типом круговорота и особенностями почвенного покрова в Южной Америке, где 47% территории занято аллитными и ферралитными кислыми почвами влажных субтропиков. В Африке существенная роль принадлежит аллитным и ферралитным кислым почвам влажных тропиков (35%) и несколько меньшая роль – слабокислым и нейтральным почвам сухих тропиков (20%).

Сопоставление данных позволило установить, что корреляция между содержанием кальция в природных водах и распространенностью круговорота с преобладанием этого элемента в целом не отмечается. Несколько иная картина установлена

для кремния. Причина заключается в том, что, чем выше распространенность на континенте кремневых типов круговорота, тем в большей степени состав материковых вод обусловлен спецификой элементов, находящихся в биомассе растений. Так, в тропических лесах важнейшие элементы сосредоточены преимущественно в огромной растительной массе, при этом в почвенной толще процессы накопления гумуса и биофилов носят ограниченный характер. Относительно кальция наблюдается более сложная картина. Кальций отличается меньшей распространенностью в литосфере по сравнению с кремнием. Так, если массовая доля кремния составляет 25,75%, то для кальция всего лишь 3,3%. В то же время кальций довольно хорошо мигрирует в кислых, слабонейтральных и щелочных почвах.

Однако вместе с тем этот элемент легко осаждается в почвах, образуя различные карбонатные соединения. Кроме того, следует учитывать высокую биофильность этого элемента, активно удерживаемого в составе живого вещества. Все эти причины, вероятно, определяют слабую связь между долей участия кальция в круговороте и в составе материковых вод.

Следует подчеркнуть, что преимущественно на всех континентах энергично выносятся только те – элементы, которые не удерживаются ни в биомассе растений, ни в пределах почвенного профиля. Относительно пойменных территорий это положение было сформулировано еще Г.В. Добровольским [1968]. Очевидно, что на современном этапе почвы как буферные системы еще обеспечивают относительное равновесие в биосфере в пределах крупных континентов, что нельзя отнести в полной мере к ее отдельным участкам, где распространены загрязненные, нарушенные или деградирующие почвы. Этим и объясняется пока еще существующая тесная связь между типологией круговорота и химизмом природных вод. Если деградационные процессы в почвах пойдут далее, последствия для биосферы могут быть катастрофическими. Пока педосфера еще функционирует в пределах оптимума, чего нельзя сказать об атмосфере, для которой в последние годы отмечен ряд серьезных нарушений.

Любые нарушения почвенных процессов приводят к изменению типов круговоротов, что ведет к смещению соотношений между важнейшими элементами в природных водах. При сопоставлении характера биологического круговорота и почвенного покрова следует помнить о различном возрасте почв. Так, если почвы Русской равнины имеют, как правило, голоценовый возраст, то почвенный покров некоторых тропических регионов, формирующихся на древних корях выветривания, насчитывает миллионы лет.

Таким образом, почва как многокомпонентная система всегда является центром биологического круговорота. Она обеспечивает его протекание работой различных механизмов. Среди них не только механизм выветривания, снабжающий питательными элементами живые организмы на ранних стадиях круговорота, но и механизм удержания биофильных элементов, что обуславливается глинистыми минералами. В почве создаются и удерживаются новые биогенные тела природы, причем возобновляемые, такие как подстилка и гумус, чью роль в круговороте трудно переоценить. Последние обеспечивают и причем чрезвычайно длительный период нормальное функционирование наземных экосистем и высокую продуктивность. Почва одновременно может являться транзитной системой для поступления биофильных элементов, участвующих в круговороте. Таким примером является внеландшафтное поступление веществ из атмосферы, а также из почвенно-грунтовых вод или поступление элементов с латеральным потоком. В жестких экологических условиях, например, в северной тайге или тундре не случайно более высокая продуктивность обнаруживается в условиях склоновых, часто полугидроморфных ландшафтов, где осуществляется

дополнительное поступление биофильных элементов с латеральным потоком. Поэтому биологический круговорот осуществляется не только на фоне различных петрографических матриц, но и различных условий функционирования почвы. В заключение отметим, что функционирование почвы может быть не только дополнительным фактором обеспечивающим цикличность круговорота, но и зачастую ведущим, причем на разных уровнях организации биосферы.

## Глава 10

### ВЛИЯНИЕ РАСТЕНИЙ НА ПОЧВУ

В 1881 г. вышла книга Ч. Дарвина “Дождевые черви”, где великий натуралист показал роль червей в формировании почвы, главным образом, ее гумусового горизонта. О роли растений в этом процессе Ч. Дарвин не говорил. В то же время в своем одном из первых определений почвы В.В. Докучаев не упомянул животных. Ознакомившись с книгой Дарвина, Докучаев внес поправку, введя в определение почвы роль животных. Но он подчеркнул, что растения играют первую роль, как первичный источник органического вещества. Растения – автотрофы, продуценты. Они синтезируют органическое вещество (их масса на Земле  $2,4 \times 10^{12}$  т, к ним относят также серобактерий, железобактерий и пр.). Гетеротрофы – редуценты ( $0,02 \times 10^{12}$  т, животные, микроорганизмы), питаются органическим веществом и разлагают его до  $\text{CO}_2$  и воды (фитофаги едят живые растения, зоофаги – хищники, некрофаги едят трупы животных, сапрофаги – растительные остатки).

#### Растения и животные в экосистемах

Растения – организаторы экосистем, начало трофической цепи, формируют основную структуру экосистем. Формации растений вместе с животными образуют разные биомы. К ним относят: полярные пустыни, тундры, лесотундры, тайгу, смешанные и широколиственные леса, степи, полупустыни,

Таблица 28

Запасы компонентов в фито-(1), мезо-(2) и педострате(3)

Зона	Фитомасса, т/га			Прирост, т/га	Мортмасса, т/га			Микробная масса, $\times 10^9$ клеток/га		
	1	2	3		1	2	3	1	2	3
Тундра	17	10	4	1,6	25	80	30	3	40	170
Северная тайга	189	20	5	6,6	10	80	75	90	4	750
Южная тайга	342	17	8	12,6	12	22	100	250	2600	450
Широколиственный лес	250	12	12	12,6	3	3	175	378	600	3000
Степь	10	8	10	8,2	2	3	200	31	1175	1800
Сухая степь	5	2	10	2,8	0,2	0,2	33	17	0,4	1300
Пустыня	1	0	6	3,0	0,1	0,1	25	2	0	375
Субтропический лес	400	0	15	25,5	30	2,5	500	720	4	1500
Тропический дождевой лес	470	0	20	29,2	30	2,5	400	840	4	1500

Таблица 29

**Распределение фито-, морт-, зоо- и микробной массы по стратам  
(в % от запаса этих компонентов в экосистеме в целом)**

Зона	Фитомасса			Мортмасса			Зоомасса			Микробная масса		
Тундра	50	30	20	15	60	25	0	90	10	20	2	78
Северная тайга	80	15	5	5	50	45	0	90	10	10	2	88
Южная тайга	93	5	2	10	20	70	0	50	50	8	78	14
Широколиственный лес	94	5	1	3	2	95	0	10	90	10	15	75
Ковыльная степь	50	20	30	2	4	94	0	5	95	6	50	44
Сухая степь	20	10	70	1	2	97	0	2	98	2	0	98
Пустыня	15	5	80	2	2	96	0	5	95	2	0	98
Субтропический лес	95	0	5	6	2	92	0	5	95	30	2	68
Тропический дождевой лес	95	0	5	10	2	88	0	5	95	3	2	65

*Примечание.* Нуль в таблице означает величину меньше 0,5%.

Таблица 30

**Запасы подстилки, гумуса и зоомассы (г/м<sup>2</sup>) в разных зональных экосистемах**

Зона	О1-О3 подстилка	Гумус в слое 0-20 см	Зоомасса в О1-О3	Зоомасса в почве
Тундра	8000	6000	10	0
Средняя тайга	5100	2500	20	10
Широколиственные леса	3000	10000	60	40
Степи	2200	17000	35	200
Сухие степи	100	9000	20	20

пустыни саванны, дождевые тропические леса, муссонные тропические леса, леса средиземноморского типа из вечнозеленых жестко-мелколиственных пород деревьев.

В экосистемах суши выделяют три слоя: фито-, мезо- и педострата (табл. 28 и 29).

Фитострата включает стволы, стебли, листья, кроны. Мезострата – подстилка, верхний слой почвы, скрепленный корнями трав (дерновый горизонт) или корнями кустарничков типа брусника, голубика, черника, карликовые ивы и березы (кустарничково-корневой горизонт).

Педострата (солум) – почва от горизонта А1 или А2(Е) до горизонта С и D. Границы между стратами – фрактальные, но с определенным приближением их можно считать плоскими.

Животные в экосистемах представлены фитофагами (и сапрофагами), хищниками, некрофагами. Они используют поток органического вещества, создаваемого растениями и превращают его в воду, углекислый газ и минеральные соединения. Но часть органических веществ, переработанных гетеротрофами, превращается в почвенный гумус.

## Воздействие растений на почву

Растения берут из почвы химические элементы и создают фитомассу – источник гумуса. Фитомасса поступает в почву. Ежегодно на поверхность почвы поступает 1–30 т/га опада, мортмассы (в зависимости от типа экосистемы). Запасы корней в почве достигает 20 т/га в тропическом лесу, а в степи, широколиственных лесах и тайге 8–12 т/га. Ежегодно отмирает до 30% корней. Корни травяных растений и частично тонкие корни деревьев способствуют образованию гумуса в дерновом слое (Ад), кустарничково-корневом (Акк) и, частично, в горизонте А1. Эти горизонты – фабрика гумуса в почве. Гумусирование идет только в этих слоях почвы. В более глубоких слоях гумус или приносится водой (иллювиальный процесс), или же накапливается при медленном нарастании почв кверху в результате поступления мелкозема, или же перемешивается животными и заносится в более глубокие слои. Гумусирование привнесенного мелкозема прослеживается в пойменных и вулканических почвах. Но и другие глубокогогумусные почвы (бурые лесные, степные черноземы, луговые почвы) образовались в результате нарастания почв кверху при поступлении мелкозема в функционирующую экосистему без ее нарушения. Так, микро- и мезозападины в степях весной после снеготаяния и после ливневых дождей часто заполняются стекающей в них водой. Объем добавочной воды измеряется 200–600 мм. Вместе с водой смываются почвенные частицы. Одновременно идет промывка почвы западины и ее усадка. Таким образом формируются более глубокий гумусный горизонт в этих почвах.

Начиная с П.А. Костычева, многие исследователи считают главным источником гумуса – корни. В.В. Докучаев был более осторожен и указывал на возможное большое участие в гумусообразовании наземной фитомассы. Наблюдения за модельными насаждениями (в лизиметрах, специальных посадках, на отвалах горных пород) показали, что в течение нескольких десятков лет в отложениях породы формируется небольшой гумусовый горизонт (табл. 31). Мощностью 5–6 см. Рыхление и вспахивание его увеличивает мощность гумусового горизонта до глубины вспашки.

Корреляцию между массой корней, содержанием гумуса, рН почвы, количеством и составом обменных катионов найти не удалось. Связь гумуса с биотой, в том числе с растениями, оказалась сложнее.

Растения потребляют воду из почвы. В то же время часть осадков не достигает почвы, а задерживается растительным пологом. Различия в водном режиме, потреблении и возвращении питательных веществ, в производстве фитомассы приводит к определенным различиям в свойствах почв под разными растениями.

Например, на пашне были разбиты ельник, сосняк, березняк. Известно, что в ельниках количество жидких осадков, достигающих поверхности почвы, составляет 60–80% от суммы таких же осадков в сосняке и березняке. В зимнее время ель своей кроной задерживает больше снега, что приводит к формированию снежного покрова меньшей мощности (40 см при 70 см в березняке) и промерзанию почвы до 20 см по сравнению с 2–3 см в сосняке и березняке. Фитомасса осоки волосистой в ельнике достигает 50 г/м<sup>2</sup>, в березняке – 70 г/м<sup>2</sup>. В сосняке волосистоосоковом сформировалась среднедерновая – среднеподзолистая почва. Для нее характерны горизонты: А1 – суховатый, серый с бурым оттенком, комковато-ореховатый средний суглинок; Ап – окультуренный старопашотный, серый, с темно-бурым оттенком, местами светло-бурые пятна, комковато-ореховый средний суглинок, старопашотный горизонт дифференцируется

Таблица 31

**Изменение лесовидного суглинка (1) под воздействием растений за 30 лет  
[Кауричев и др., 1974]**

Вариант, растение	Глубина, см	Гумус, %	pHс	Гидролит. кисл., мг/100г	Са, мг экв/100г	Mg мг экв/100г	Емкость обмена [по Каппену]	Al [по Соколову]	SiO <sub>2</sub> , валовая, %	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> валовая %	Ил, %
1	до/о	0,18	4,2	3,9	н/о	н/о	9,6	7,6	н/о	н/о	15,3
Дуб	2-5	6,28	4,4	12,3	6,3	1,4	4,9	9,8	82,3	13,1	20,3
	5-10	0,57	3,7	8,7	3,4	1,6	7,7	23,8	83,9	12,2	20,9
	10-15	0,45	3,6	8,7	3,2	1,4	4,6	35,2	84,4	12,1	20,8
	15-25	0,28	3,6	7,8	3,5	1,2	4,7	28,1	н/о	н/о	20,3
	25-35	0,25	3,8	6,5	4,2	1,4	5,6	22,1	н/о	н/о	н/о
	35-45	0,15	3,8	4,7	4,6	1,1	5,6	12,0	84,1	11,7	20,7
	1	до/о	0,18	4,2	4,2	н/о	н/о	9,8	6,9	н/о	н/о
Лес смешанный	0-5	3,84	5,6	3,8	8,3	2,5	10,8	1,2	83,2	12,1	19,4
	5-15	0,61	5,7	1,1	6,7	3,7	10,4	0,2	82,8	12,7	22,9
	15-25	0,28	6,0	0,7	7,7	3,5	11,2	0,2	77,5	16,9	25,0
	25-35	0,20	6,0	0,5	8,6	2,8	11,4	0,2	н/о	н/о	24,9
	35-48	0,06	6,2	0,5	8,2	2,8	11,0	0,2	78,2	15,5	23,0
1	до/о	н/о	6,0	0,7	6,3	2,6	8,9	Сл.	78,9	13,2	24,6
Ель	2-4	6,86	3,8	18,0	12,5	3,5	16,0	6,4	80,6	14,1	24,6
	4-14	0,93	4,4	4,6	6,3	2,3	8,5	1,1	78,1	16,3	24,1
	14-26	0,33	5,0	2,2	7,0	3,0	10,0	0,5	78,1	16,0	26,6
	27-35	0,17	5,5	1,4	6,8	3,0	9,8	0,5	н/о	н/о	29,4
	35-72	0,15	6,4	1,1	6,0	3,0	8,9	0,2	н/о	н/о	н/о
	72-99	0,12	6,7	0,7	6,3	2,5	8,8	сл.	78,9	13,2	24,6
	99										

на A1 и A1A2. A1A2 –палевый, с серовато-бурым оттенком, неясно-пластинчатый средний суглинок. A2B – состоит из двух морфонов. A2 – белесый, мучнистый, местами распадается на пластинки, окраска которых снизу более темная, чем сверху, как в типичном A2. Морфон B – тяжелосуглинистый, ореховато-призматический с присыпкой по граням призм. Внутри призм заметны кутаны охристого и вишневого цвета. Горизонт B аналогичен морфону B. Почва в ельнике относится к слабодерновой – среднеподзолистой. A0A1 состоит из детрита и A1, сырой, темно-серо-бурий, комковато-зернистый иловатый тяжелый суглинок. A1A2 – светловато-бурий с желтоватым оттенком, средний суглинок,



Таблица 32

## Изменение рН в тессере ельника (1), сосняка (2), березняка (3)

N	0-5 см			5-10 см			10-15 см			15-20 см			20-30 см		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	4,1	4,9	4,4	4,3	5,1	4,5	4,5	5,0	4,6	4,9	5,2	4,6	5,0	5,0	4,8
2	4,1	5,0	4,8	4,4	5,2	4,8	4,6	5,2	4,9	4,7	5,2	4,8	4,9	5,2	4,9
3	4,3	5,1	5,0	4,2	5,3	5,1	4,7	5,1	5,3	4,8	5,3	5,7	5,0	5,2	5,3
4	4,7	5,0	5,0	4,7	5,1	5,0	4,8	5,1	5,1	4,8	5,2	5,1	5,0	5,1	5,1
5	4,7	5,0	4,9	4,5	5,1	5,0	5,0	5,2	5,1	4,9	5,0	5,1	5,0	5,1	5,1
6	4,4	4,9	4,9	4,6	5,2	5,0	4,8	5,2	5,1	4,9	5,2	5,1	5,0	5,1	5,1
7	4,2	4,9	4,9	4,5	5,1	4,7	4,7	5,2	5,0	4,9	5,2	5,1	5,0	5,1	5,1
8	4,7	5,0	5,1	4,6	5,0	5,1	4,8	5,3	5,1	4,9	5,2	5,1	5,0	5,2	5,1
9	4,6	4,8	5,1	4,6	5,0	5,0	4,9	5,1	5,2	4,8	5,1	5,2	5,0	5,0	5,1
10	4,8	4,9	5,1	4,9	5,0	5,0	5,0	5,2	5,2	4,9	5,2	5,1	5,3	5,0	5,1
11	4,7	4,9	5,2	4,6	5,0	5,1	4,9	4,9	5,1	4,9	5,0	5,1	5,2	5,1	5,1
12	4,5	5,1	5,2	4,6	5,1	4,9	4,8	5,2	4,9	4,9	5,2	5,0	5,0	5,2	5,1
13	4,9	5,3	5,3	4,7	5,3	5,1	4,7	5,2	5,0	4,9	5,2	5,1	5,1	5,1	5,2
14	4,8		5,2	4,5		5,1	4,8		5,0	5,0	5,3	5,1	5,1		5,1
15	4,4	5,2	5,0	4,5	5,1	5,1	4,7	5,1	5,0	4,8	5,2	5,1	4,9	5,2	5,1
16	4,4	5,1	4,9	4,7	5,1	4,9	4,7	5,2	4,9	4,9	5,3	5,1	5,2	5,1	5,3
17	4,5		4,9	4,5		4,8	4,6		5,0	4,9		5,1	5,0		5,2
18	4,6			4,6			4,7			4,7			4,9		

Таблица 33

## Содержание гумуса в тессерах ельника (1), сосняка (2), березняка (3)

N	0-5 см			5-10 см			10-15 см			15-20 см			20-30 см		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	8,31	7,18	3,15	4,10	3,73	1,62	2,91	2,95	1,37	1,16	1,50	1,24	0,60	0,78	0,58
2	9,53	4,23	3,10	4,73	2,95	2,40	2,89	2,06	1,72	1,32	1,22	1,21	0,69	0,67	0,58
3	8,88	7,02	3,27	3,44	4,51	2,33	2,50	2,95	1,77	1,44	2,06	1,77	0,76	1,14	0,66
4	6,98	6,29	3,91	3,85	3,46	2,83	2,09	3,38	1,82	1,18	2,01	1,47	0,82	0,96	0,73
5	9,20	7,64	2,66	3,65	4,85	2,18	1,18	3,06	1,62	1,65	1,11	1,16	0,82	0,39	0,48
6	7,79	7,24	1,93	2,89	5,07	3,21	1,73	1,81	1,54	1,07	3,00	0,96	0,82	0,81	0,53
7	4,91	6,96	3,43	2,12	4,18	2,28	1,73	2,95	1,42	0,96	1,45	1,04	0,80	0,61	0,33
8	5,39	6,07	4,58	2,12	3,90	2,72	1,43	3,12	1,45	1,04	1,78	1,86	0,44	0,36	0,61
9	6,17	7,35	3,86	2,31	4,34	1,55	1,21	2,84	1,09	1,51	1,06	0,81	0,58	0,72	0,56
10	6,87	8,21	3,55	1,73	5,40	2,00	1,15	4,07	1,19	0,85	1,84	0,96	0,44	1,06	0,51
11	4,18	6,29	3,86	1,95	3,45	1,50	1,29	3,95	0,92	1,15	2,67	0,43	0,55	0,67	0,36
12	5,16	8,47	4,45	2,17	6,41	2,82	1,22	2,67	2,39	0,96	3,95	0,79	1,15	0,39	1,20
13	4,07	6,41	4,09	7,12	4,85	2,44	2,23	2,59	1,78	1,73	1,42	1,22	1,07		0,69
14	9,14		3,25	2,36		1,40	1,43		2,32	1,07	1,29	1,14	0,48	0,95	0,64
15	3,79	9,01	2,88	1,92	4,85	1,76	1,35	3,79	1,65	1,17	2,84	1,55	0,36	0,80	0,74
16	8,37	7,94	2,95	1,95	4,73	1,88	1,07	3,68	1,55	0,60	1,04	0,81	0,60		0,51
17	7,27		3,38	2,23		2,21	1,16		1,65	0,58		0,89	0,76		0,36
18	10,3	7,09		3,18			1,84				1,30		0,68	0,73	
Ср	7,02	7,19	3,43	2,99	4,45	2,18	1,69	3,06	1,60	1,16	1,89	1,11	0,64	0,72	0,59
Ме	7,13			2,33	4,51		1,43	2,95		1,15	1,78				

много корней растений, комковато-порошистый, местами слоеватый. А2 – белесый, местами охристо-желтый, пластинчатый, встречаются мелкие ортштейны. В тессере образует линзы, больше выражен около стволов елей. А2В – среднесуглинистый, состоит из морфонов А2, белесого с желтовато-охристым оттенком, пластинчатого, и В, призмовидного, охристо-бурого. Ниже – горизонт В, красновато-бурый, с охристым оттенком, с кутанами по граням призм, тяжелый суглинок. Встречаются черно-бурые вкрапления Мп. В березняке образуется среднедерново-слабоподзолистая почва. Горизонты: А1 – серовато-бурый комковато-порошистый средний суглинок. А1А2 – бурый с желтоватым оттенком, с темно-серыми пятнами, средний суглинок, комковато-мелкопризматический, местами выламывается пластинками. А2В делится на два морфона: в одном преобладает А2, в другом В. А2 – неясно пластинчатый, В – призмовидный, средний суглинок, более тяжелый, чем А2. Горизонт В – красновато-бурый с охристым оттенком, тяжелый суглинок, местами по граням агрегатов присыпка. Анализ химических свойств показал различия между ними для почв под разными деревьями. Заметны различия в рН почвы как между разными деревьями, так и в пределах одной тессеры (табл. 32).

Изменения в кислотности почв (рН) свидетельствуют о заметном влиянии стволов всех трех пород, при этом почва у всех трех пород около ствола подкисляется не менее, чем до 15 см по глубине. Верхний почвенный слой в ельнике кислее в среднем, чем почвы под сосной и березой. Отмечается тенденция к изменению рН почвы на границе крон.

Среднее содержание гумуса в почве заметно ниже в березняке, по сравнению с ельником и, особенно, с сосняком. Четко прослеживается большая гумусированность почвы под сосняком на глубинах 5–20 см по сравнению с ельником (табл. 33). Можно предположить, что в этом проявляется действие пахоты и удобрения почвы навозом, проведенное при посадке сосняка. Средние значения гумусированности почв под елью и березой заметно отличаются лишь в слое 0–5 см, ниже они близки, что говорит о сильном влиянии современного ценоза на верхний слой почвы и достаточно быстром затухании этого влияния с глубиной, уже на 10 см. Состав и содержание обменных катионов, как и ожидалось, заметно различаются по тессерам и также в пределах тессеры (табл. 34–36). Особенно по содержанию обменного алюминия выделяется приствольная часть почвы. Отмечается общий тип изменения свойств почв с глубиной. Исследованные свойства обнаруживают в первую очередь связь с положением их в БГЦ, в парцелле, в тессере. Связи с распределением в почве корней не наблюдается. Ни рН, ни обменные основания не коррелируют с содержанием корней в почве. Количество корней в почве коррелирует с содержанием гумуса при анализе профильного их распределения. Но нет никакой корреляции между горизонтальным распределением корней и содержанием гумуса (табл. 37–39).

Сравнение показывает, что между содержанием гумуса, рН, составом и содержанием обменных катионов и запасами корней нет прямой связи. Очевидно, влияние корней нельзя охарактеризовать как функцию их массы. Дело в том, что общая масса корней обычно уступает массе почвенного слоя, в котором они распространены. Особенно в слоях ниже 20 см. Но в верхних слоях их масса может достигать достаточно большой величины, особенно в дерновом и кустарничково-корневом горизонтах. Относительно продолжительная жизнь корней приводит к тому, что они отмирают и поступает в почву ежегодно в сравнительно небольших количествах и в одних и тех же местах почвы, где корни локализованы.

Таблица 34

**Содержание (мг-экв/100 г почвы) и состав обменных катионов  
в сосновой тессере в разных по глубине слоях почвы (см)**

N	0-5				5-10				10-15			
	Ca	Mg	Al	H	Ca	Mg	Al	H	Ca	Mg	Al	H
1	8,7	3,7	0,1	0,3	7,5	2,5		0,3	7,5	2,5	0,1	0,2
2	10,0	1,2	0,6	0,2	8,7	2,5		0,3	7,5	2,5	0,1	0,1
3	11,2	2,5	0,1	0,3	7,5	3,7	0,2	0,2	9,3		0,2	0,2
4	11,2	3,7	0,5	0,3	8,7	3,7	0,1	0,3	8,7	2,5	0,3	0,1
5	12,5	2,5	0,1	0,4	8,7	3,7	0,2	0,2	8,7	1,2	0,3	0,1
6	10,0	3,7	0,3	0,3	12,5		0,3	0,2	8,7		0,1	0,2
7	8,7	3,7	0,4	0,2	8,7	1,2	0,2	0,2	10,0	1,2	0,3	0,1
8	8,7	2,5		0,3	10,0	1,2		0,3	7,5	2,5	0,1	0,1
9	10,0	3,7	0,7	0,3	10,0	1,2	0,3	0,1	7,5	2,5	0,3	0,1
10	12,5	2,5	0,5	0,3	11,2	1,2	0,3	0,3	8,7	2,5	0,1	0,3
11	10,0	2,5	0,6	0,2	7,5	2,5	0,2	0,2	8,7	2,5	0,9	0,1
12	12,5	2,5	0,1	0,4					8,7	2,5		0,3
13	6,2	1,2	0,1	0,1	8,7	3,7	0,2	0,2	8,7	1,2	0,1	0,2
15	11,2	2,5		0,3	10,0	3,7		0,3	8,7	2,5	0,1	0,3
16	12,5	3,7	0,1	0,3	10,0	2,5	0,3	0,3	8,7	3,7	0,2	0,1
Ср	10,4	2,2	0,3	0,3	9,2	2,6	0,3	0,3	8,5	2,3	0,3	0,2

Таблица 35

**Содержание (мг-экв/100 г почвы) и состав обменных катионов в еловой тессере  
в разных по глубине слоях почвы (см)**

N	0-5				5-10				10-15			
	Ca	Mg	Al	H	Ca	Mg	Al	H	Ca	Mg	Al	H
1	12,5	1,2	3,5	1,0	6,2	2,5	4,0	0,4	6,2	1,2	3,3	0,3
2	9,4	1,9	4,4	0,5	5,0	3,7	3,3	0,3	6,2	1,2	2,5	0,2
3	8,8	4,7	2,9	1,1	3,9	2,8	4,9	0,6	4,0	3,2	3,2	0,5
4	10,0	2,5	1,3	0,3	5,0	2,5	1,9	0,3	3,7	2,5	2,1	0,1
5	11,2	1,2	0,9	0,4	5,6	1,9	2,5	0,2	5,0	2,5	1,6	0,2
6	7,5	3,7	2,0	0,4	5,0	2,5	2,3	0,3	5,0	1,2	1,5	0,3
7	6,2	2,5	3,6	0,4	6,2		3,3	0,3	3,7	3,7	2,0	0,2
8	8,7	3,7	1,3	0,4	3,7	3,7	3,3	0,3	6,2		1,5	0,3
9	7,5	3,7	1,5	0,3	6,2		2,8	0,3	6,2		1,0	0,3
10	8,7	2,5	1,3	0,3	5,0		1,5	0,3	3,7	3,7	1,0	0,3
11	6,2	2,5	1,7	0,3	5,0		1,9	0,3	6,2		1,5	0,3
12	6,2	2,5	2,8	0,3	3,7	3,7	2,8	0,3	6,2	1,2	1,9	0,3
13	13,7	2,5	0,6	0,3	7,5		2,5	0,2	5,0	1,2	2,0	0,2
14	15,0	2,5	1,0	0,3	5,0	1,2	2,9	0,2	4,4	1,9	1,6	0,2
15	5,5	2,5	4,0	0,3	3,7	1,2	2,2	0,4	3,7	1,9	1,8	0,4
16	8,7	1,2	2,2	0,4	5,0		1,9	0,3	7,5		1,0	0,3
17	7,5	3,7	2,7	0,4	5,0	1,2	2,8	0,3	5,0		1,6	0,2
18	10,0	2,5	1,8	0,4	5,0	1,2	3,3	0,3	3,7	2,5	2,4	0,3
Ср	9,1	2,2	2,2	0,5	5,1	2,1	2,8	0,3	4,2	2,1	1,9	0,3

Таблица 36

**Содержание (мг-экв/ 100 г почвы) и состав обменных катионов  
в березовой тессере в разных по глубине слоях почвы (см)**

N	0-5				5-10				10-15			
	Ca	Mg	Al	H	Ca	Mg	Al	H	Ca	Mg	Al	H
1	3,8	2,0	4,0	0,4	2,9	1,3	4,4	0,4	3,2	1,5	3,7	0,3
2	4,7	3,2	2,2	0,3	4,0	1,8	2,0	0,3	4,6	3,6	2,6	0,3
3	4,4	5,0	1,4	0,2	4,3	4,5	1,1	0,3	4,6	4,6	1,3	0,2
4	7,0	2,5	0,6	0,4	5,5	2,7	0,8	0,4	4,9	1,6	0,9	0,3
5	5,0	3,7	1,9	0,4	4,4	4,3	1,4	0,4	4,1	4,6	1,0	0,2
6	6,7	2,6	0,7	0,2	5,2	3,0	1,6	0,4	4,2	2,5	1,2	0,3
7	6,6	3,1	0,8	0,4	5,4	1,9	1,6	0,4	4,7	3,2	1,4	0,3
8	7,5	6,7	0,6	0,3	6,2	1,2	1,3	0,2	5,0	3,7	1,0	0,1
9	8,7	2,5	0,8	0,1	5,6	1,9	0,7	0,2	6,2	1,2	1,2	0,1
10	6,8	3,0	0,6	0,2	4,5	1,8	1,0	0,3	4,3	1,9	1,1	0,4
11	7,5	2,5	1,2	0,1	6,2		2,1	0,1	3,7	2,5	1,7	0,1
12	5,0	1,2	0,5	0,3	6,2	3,7	0,8	0,1	5,0	2,5	1,2	0,1
13	7,5	3,7	1,0	0,1	5,0	2,5	1,2	0,1	7,5		1,2	0,1
14	6,2	2,5	0,1	0,3	5,0	2,5	0,3	0,4	6,2	1,2	0,7	0,2
15	6,2	0,6	0,1	0,3	7,5	1,2	0,6	0,3	3,7	2,5	0,8	0,1
16	4,4	3,1	0,6	0,3	5,0	2,5	0,6	0,3	4,4	1,2	0,4	0,3
17	6,2	2,5	1,0	0,1	5,0	2,5	2,7	0,1	5,0	1,2	1,2	0,1
Ср	6,1	2,9	1,0	0,2	5,2	2,4	1,4	0,3	4,8	2,4	1,3	0,2

Таблица 37

**Запасы фракций корней в почве еловой тессеры (г/образец) в разных  
по глубине слоях почвы (см)**

Диаметр корня, мм	У ствола					Под кроной (1 м от ствола)					На границе кроны (2 м от ствола)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30
0,3	1,3	1,0	0,5	0,1	0,2	0,9	1,1	0,3	0,5	0,3	0,6	0,4	0,6	0,1	0,3
0,5	0,2	0,3	0,1	0,0	0,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2
1,0	0,3	0,4	0,2	0	0,1	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,5
2,0	0	0,3	0	0,2	0,4	1,2	0,1	0,3	0	0	0,3	0	0,5	0	0,2
3,0	0	0,3	0	0	0	0	0,2	0,5	0,5	0	1,4	0,4	0,4	0,1	0
5,0	0	0,6	0	0	0,3	1,5	0	0	0	0	0	0,3	2,4	0	0,7
>5,0	0	0	3,3	0	0	0	0	0	0	0	5,1	0,7	0	0	0
кора	0	0,1	0,5	0,1	0,2	0	0	0	0	0	0	0,6	0,2	0,1	0,1
м1	0,5	0	0,7	0	0,1	0	0	0	0	0	1,7	0,1	0,2	0,3	0
м2	0,5	0,8	1,0	0,3	0,2	0,5	0,8	0,3	0,2	0,4	0,2	1,1	0,5	0,7	0,3
л1*	196	0	30	25	13	52	18	12	0	0	152	30	14	0	1
л2	0	0	81	19	16	789	0	415	0	0	0	0	0	0	0
к	0	437	0	0	0	547	7	0	0	0	297	0	0	0	0
01	32	23	0	0	0	246	0	0	0	0	514	12	0	0	0
02	147	33	90	0	3	528	93	12	5	1	634	29	24	0	3
т	35	0	0	0	0	82	17	0	53	0	165	0	0	0	0

*Примечание.* М – мертвые корни; 1 – толстые; 2 – тонкие; л – корни лещины, 1 – <0,5 мм, 2 – толстые; к – корни кустарников, 01 – корневища и 02 – корни осок; т – корни трав; \* – здесь и ниже величины в мг/образец.

Таблица 38

## Запасы фракций корней (мг) в сосновой тессере в разных по глубине слоях почвы (см)

Диаметр корня, мм	У ствола					Под кроной (1 м от ствола)					На границе кроны (2 м от ствола)			
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	0-5	5-10	10-15	1
0,3	283	430	191	91	81	674	742	452	96	296	648	1484	797	1
0,5	327	140	95	62	75	639	186	284	90	120	340	191	304	7
1,0	90	163	163	88	74	266	531	371	137	58	185	256	289	1
2,0	0	162	324	144	0	265	524	287	347	234	251	258	1070	1
3,0	452	886	398	0	134	681	2020	189	0	162	0	0	0	1
5,0	0	0	0	0	0	0	1450	0	1450	0	408	2170	3240	2
>5	0	0	0	0	0	0	0	3800	2400	0	0	4590	2730	1
кора	0	0	19	0	4	0	0	0	0	0	22	27	104	0
м1	0	136	126	31	50	0	264	320	63	60	66	336	240	2
м2	0	0	66	31	26	302	114	10	174	146	165	226	89	3
л1	0	123	88	56	105	309	48	157	184	50	263	326	210	1
л2	0	96	0	75	144	0	384	398	485	134	0	618	699	1
к	0	147	79	142	100	217	278	78	0	0	790	60	157	6
01	0	23	0	0	0	166	0	108	0	0	230	0	0	0
02	0	15	0	0	0	148	83	0	0	0	744	0	0	2
т	335	45	22	31	19	18	51	179	687	135	132	12	3	4

Примечание. В 1-м столбце обозначения те же, что в табл. 37.

Масса корней составляет лишь 0,1–3% от массы почвы и сфера их непосредственного влияния составляет до 3 мм от поверхности корня, в ризосфере (зона вблизи мелких сосущих корней) заметны увеличение содержания гумуса, снижение рН, но оно очень мало отражается на свойствах почвы в целом. В ризосфере, как правило, большее количество микроорганизмов, простейших, связанных с ними других беспозвоночных животных. Именно поэтому непосредственно в ризосфере почва изменена по сравнению с общей массой почвы. Но объем почвы, приуроченный к ризосфере также составляет менее 1% от массы всей почвы (кроме дернового и кустарничково-корневого горизонтов). Именно поэтому эти горизонты и работают как фабрики гумуса, при этом в почву (в эти горизонты) поступает также наземная фитомасса.

Если почва промерзает на длительное время, разложение фитомассы замедляется на стадии формирования подстилки (мортмасса). Фитомасса – максимальна в лесах (тропических, субтропических, широколиственных и в южной тайге). Мортмасса (подстилка) в целом уменьшается от тундры и северной тайги к степи. При этом увеличиваются запасы гумуса в почве (почвенной “мортмассы”). Масса животных организмов ведет себя также. Масса наземных животных составляет меньше 0,5% массы всех животных в экосистеме. В подстилке и органогенных горизонтах (мортмасса) масса животных достигает 90% от общей их массы в экосистеме (в тундре и северной тайге), снижаясь вместе с уменьшением запасов подстилки в степях до 5–2% от их общей массы в экосистеме. В то же время в почве масса животных возрастает до 90–98% от общей их массы в экосистемах. Большинство животных в степях и пустынях живет в почве, а в тайге – в подстилке. Аналогично животным ве-

Таблица 39

## Запасы корней (г) в березовой тессере в разных по глубине слоях почвы (см)

Диаметр корней, мм	У ствола					Под кроной (1 м от ствола)					На границе кроны (2 м от ствола)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30
0,3	0,8	0,6	0,1	0,1	0,3	1,9	1,1	0,6	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8	0,4	0,3
0,5	0,4	0,4	0,1	0,1	0,3	0,8	0,3	0,1	0,4	0,4	0,2	0,5	0,5	0,0	0,2
1,0	0,4	0,7	0,4	0,6	0,4	0,4	0,8	0,8	0,5	0,3	0,7	0,5	0,5	0,2	0,5
2,0	0	0,6	0,5	0,5	0,4	0,1	1,4	0,9	1,0	0,5	0,1	1,2	0,6	0,4	0,7
3,0	0,2	1,6	1,8	2,0	0	0,4	1,5	0	0,5	0,8	0,7	0	0,9	1,3	0
5,0	0	0	0,8	0	1,7	0	0	0	4,3	0	0	0,6	0	0	1,1
>5	6,9	6,6	9,7	0	0	0	0	0	2,0	0	32	13	9,4	0	6,1
кора*	17	143	261	206	1356	0	283	154	63	202	376	103	494	87	49
m1	70	267	77	56	117	0	104	49	14	0	0	188	933	0	205
m2	22	180	133	155	185	248	68	178	236	116	341	326	270	103	103
л1	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
л2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	169	0	0	0	0
к	0	28	50	45	0	11	790	0	0	0	71	1274	0	0	0
01	1,3	93	4	0	0	1,3	116	0	17	0	15,5	48	0	0	0
02	4,0	248	152	29	8	1,8	340	67	51	35	1,5	106	138	291	48
т	0	39	0	0	0	504	0	11	0	0	0	0	0	0	0

Примечание. Обозначения те же, что в табл. 37. В нижней части табл. выделены величины, выраженные в г, \* - с этой строки и ниже величины в мг/образец.

дут себя микроорганизмы: в тайге их максимум отмечается в подстилке, южнее - в почве.

Для представления о соотношении масс организмов в экосистеме приведем данные по структуре биомассы в лесу в расчете на 1 га. Масса листьев деревьев - 4-6 т, ветвей - 30-50 т, стволов - 100-540 т. Растения травяного яруса - 1-2 т. Крупные млекопитающие (лось, кабан, олень, волк) - 2 кг, мелкие млекопитающие (грызуны, хищники, насекомоядные) - 5 кг, птицы - 1-3 кг, почвенная фауна - до 1,5 т, грибы и микроорганизм - до 2-3 т. Черви, питающиеся опадом, потребляют его в среднем за день до 5 мг/г живого веса. Черви ускоряют разложение опада в два-три раза. В присутствии червей (*N. caliginosus* 20 экз. и *L. terrestris* 3 экз.) образуется слой перегноя (Н или 03) и гумусовый слой А1 мощностью до 5 см. В отсутствие червей - только слой F (02). Другие представители почвенной фауны: личинки насекомых, многоножки, клещи, кольчатые черви, коллемболы и др. Они обитают в основном в подстилке и горизонте А1.

В почвах обнаружено более 1500 видов водорослей, из них 600 видов - зеленые водоросли (Clogorphyta), 400 - синезеленые или цианобактерии (Cyanophyta), 300 - диатомовых (Bacillariophyta) и 200 - желтозеленых (Xanthophyta). Суммарная масса водорослей в почвах 0,5-1 т/га. Водоросли фиксируют азот из атмосферы, накапливают углерод, служат началом трофической цепи.

Большую роль в разложении органического вещества играют грибы и актиномицеты. Длина мицелия актиномицетов в почвах составляет от 100 до 300 м/г

почвы, повышаясь в торфяниках до 6000 м/г. Количество клеток измеряется 2–300 млн/г. Грибы разлагают древесину, подстилку, ускоряют оборот углерода в экосистемах.

При разложении образуются промежуточные продукты, типа гумуса, торфа, отложений угля и пр. Поскольку любой процесс характеризуется коэффициентом полезного действия, то и функционирование трофической цепи идет с большими энергетическими потерями. Так, растения усваивают лишь 3–7% солнечной энергии. Для существования травоядных животных нужна масса растений в несколько раз превосходящая массу самих животных. Аналогичное соотношение наблюдается между массой травоядных животных и массой хищников. Последняя в несколько раз меньше массы травоядных животных. Это соотношение получило название экологической, или трофической пирамиды и широко обсуждается во всех учебниках по экологии.

По трофической цепи (трофическим сетям) осуществляется цикл углерода.

### Цикл углерода

Содержание углерода в атмосфере измеряется 0,03% от объема атмосферы или  $0,0233 \times 10^{20}$  г. Он составляет более 50% массы живых существ, или  $0,024232 \times 10^{20}$  г. Как видно, запасы углерода в атмосфере и живых организмах близки. В почвах запасы углерода также достигают значительной величины. По разным оценкам они достигают  $2 \times 10^{20}$  г, т.е. на два порядка больше, чем в атмосфере и живых организмах. Значительные запасы углерода отчуждены из круговорота в геологических породах. Закрепление углерода в углях, горючих сланцах, нефти и газах, доломитах и известняках – геологический процесс, идущий под влиянием живых организмов и приводящий к исключению углерода из биосферных циклов. Можно, вслед за Е.А. Дмитриевым, заключить, что исключение углерода из ежегодного цикла в наземных отложениях – геологический процесс. В то же время цикл углерода связанный с фотосинтезом, ростом растений, питанием животных, поступлением углерода с опадом в почву, укреплением углерода в почве при постоянном его обновлении – биосферный процесс, или, как называл его В.Р. Вильямс, малый биологический круговорот (в отличие от большого геологического).

Главная роль растений – создание органической массы (фитомассы). Педофауна и микроорганизмы преобразовывают эту фитомассу.

Известно, что педофауну разделяют на подстилочные и чисто почвенные формы. По потреблению органического вещества, участию в трофической цепи можно выделить [Стриганова, Чернов, 1980] первичных разрушителей органического материала, детритофагов и собственно гумусообразователей. К последним следует относить животных, перемешивающих органическое вещество с минеральным и способствующим формированию почвенного матричного гумуса, гумуса, закрепленного на поверхности почвенных частиц. Животные, обитающие в подстилке – в основном деструктуры, разрушающие органическое вещество. Животные, обитающие в почве, – переводят органическое вещество детрита и перегноя в почвенный гумус. (Под перегноем понимается органическое вещество, абсолютно потерявшее исходную форму, состоящее из органических коллоидов с небольшой примесью и до 20–30% минеральных частиц). Существует третья, не менее важная группа животных, перемешивающих почву, затаскивающих в почву детрит. Общую схему превращения органического вещества в гумус можно представить следующим образом: разрушители растительных

Таблица 40

**Зольность и содержание азота в % от массы экскрементов  
некоторых представителей почвенной фауны [Т.С. Всеволодова-Перель, 1979]**

Вид	Зольность		Содержание азота		Вид	Зольность		Содержание азота	
	Опад	Экскременты	Опад	Экскременты		Опад	Экскременты	Опад	Экскременты
<i>Leptojulus trilobatus</i>	2,52	7,45	1,21	1,39	<i>Dendrobena octaedra</i>	12,6	27,4	1,88	1,82
<i>Megaphyllum projectus</i>	4,50	9,60	1,23	1,43	<i>Bibio sp*</i>	7,2	17,3	1,92	1,80
<i>Tipula pellostigma*</i>	8,80	15,60	4,10	6,60	<i>Rossiulus kessleri</i>	7,2	13,3	1,59	1,62
					<i>Cylisticus albomaculatus</i>	7,2	16,4	1,84	1,90

\* личинки.

Таблица 41

**Воздействие дождевых червей на скорость разложения опада  
с октября по июль [Т.С. Всеволодова - Перель, 1979]**

Потеря веса, % от массы исходного опада	Опад березы			Опад липы		Опад дуба				
	I	II	III	II	III	II		IV		
Неизолированный опад	28	33	28	23	37	25	4	6	21	28
Изолированный опад	99	92	90	74	78	51	10	21	59	43

*Примечание.* I – ельник кислично-папоротниковый; II – березняк снытево-разнотравный; III – березняк кислично-черничный (Ярославская обл); IV – липо-ельник волосистоосоково-зеленомошный (Подмосковье, Малинки); V – букняк мертвопокровный (Закарпатье).

остатков превращают их в детрит и перегной. Часть этого материала другие животные перемешивают с почвой, образуя смесь детрита и перегноя с минеральными частицами (табл. 40).

Третья группа животных и микроорганизмы формируют почвенную органико-минеральную матрицу, где органическая часть матрицы представляет собой собственно почвенный гумус, сорбированный на минеральной матрице, на поверхности почвенных частиц. Сапрофаги, поедающие опад, хотя и увеличивают его зольность до 7–15%, но фактически не образуют почвенного гумуса. В образовании матричного почвенного гумуса, закрепленного на поверхности почвенных минеральных частиц, в первую очередь участвуют дождевые черви и данные по разложению изолированного и неизолированного опада хорошо это иллюстрируют (табл. 41).

Дождевые черви в три раза ускоряют разложение опада разных древесных пород. Собственно почвенные черви перемешивают органическое вещество с почвой, способствуя образованию матричного гумуса в почве (гумуса, закрепленного на поверхности почвенных частиц). Другие животные и подстилочные черви формируют перегной, размельченное органическое вещество с более вы-



Таблица 42

**Распределение матричного гумуса и детрита в почвах и зоогенных образованиях  
(% от а/с массы дерново-подзолистой почвы)  
[по данным А. Тиунова и Н.А. Звонковой]**

Глубина, см	С <sub>общ</sub>	С <sub>детр</sub>	До отделения детрита			После отделения детрита		
			С <sub>пфв</sub>	С <sub>гк</sub>	С <sub>фк</sub>	С <sub>пфв</sub>	С <sub>гк</sub>	С <sub>фк</sub>
Дрилософера								
5–10	5,19	2,17	1,21	0,22	0,99	0,59	0,22	0,37
10–15	4,16	1,65	0,98	0,20	0,78	0,63	0,20	0,43
15–20	3,88	0,83	0,96	0,21	0,75	0,75	0,17	0,58
Почва								
0–5	1,69	0,77	0,79	0,39	0,40	Не опр.	Не опр.	Не опр.
5–10	1,38	0,27	0,50	0,09	0,41	0,42	0,11	0,31
10–15	0,59	0,03	0,27	0,04	0,23	0,16	0,04	0,12
15–20	0,79	0,13	0,33	0,04	0,29	0,23	0,05	0,18

Таблица 43

**Состав органического вещества (% на а/с массу)  
в разных компонентах дерново-подзолистой почвы  
[по данным А. Тиунова и Н.А. Звонковой]**

Вариант	С <sub>общ</sub>	С <sub>детр</sub>	С <sub>пфв</sub>	Вариант	С <sub>общ</sub>	С <sub>детр</sub>	С <sub>пфв</sub>
Опад	25,16	22,46	2,70	Почва, гор. Ад, 0–5 см	1,69	0,82	0,79
Копролиты	4,01	1,10	1,22	Почва, гор. А1, 15–25 см	0,84	0,21	0,48
Дрилософера 15–25 см	2,72	0,55	0,79				

сокой зольностью, чем исходный опад. Подтверждают эту мысль исследования А. Тиунова. Анализировали формы гумуса в почве, в копролитах и дрилософере, или слоя почвы, выстилающей ходы червей (табл. 42 и 43).

Итак, углерод поглощается растениями в виде углекислого газа и превращается ими с помощью фотосинтеза в органическое вещество. Он закрепляется на некоторое время (от дней до сотен лет и больше) в растениях, потребляется фитофагами, по трофической цепи от фитофагов поступает к хищникам, некрофагам и сапрофагам, при этом на всех этапах часть органического вещества возвращается в атмосферу при дыхании, часть переходит в почву или донные отложения водоемов. Часть органического вещества почв превращается в гумус и надолго исключается из круговорота, часть включается в геологический круговорот углерода, образуя геологические породы (известняки, торфа, угли и пр.).

### Цикл азота

Основная масса азота содержится в атмосфере, где этот газ составляет 78% от объема атмосферы. Запасы азота в воздухе измеряются  $36,6 \times 10^{20}$  г. Среднее содержание азота в живых организмах 0,3%, что составляет приблизительно

Таблица 44

Запасы гумуса и азота в основных почвах России и прилегающих стран, т/га,  
[по данным Н.И. Болотиной]

Почва	Слой 0–20 см		Слой 0–100 см		Почва	Слой 0–20 см		Слой 0–100 см	
	Гумус	Азот	Гумус	Азот		Гумус	Азот	Гумус	Азот
Дерново-подзолистая и подзолистая	56	3,3	100	6,6	Чернозем мощный типичный	224	11,3	709	35,8
Серая лесная	104	5,6	175	9,4	Чернозем обыкновенный	137	7,0	428	24,0
Темно-серая лесная	118	6,7	296	14,0	Темно-каштановая	99	5,6	229	15,2
Чернозем оподзоленный	132	7,0	452	25,2	Серозем	41	2,8	93	8,6
Чернозем выщелоченный	192	9,4	549	26,5	Краснозем	153	4,7	282	10,5

но массу в  $0,007 \times 10^{18}$  г, т.е. на два порядка меньше, чем в атмосфере. В горных породах содержание азота в среднем измеряется 0,002% от массы, или  $0,15 \times 10^{15}$  г в литосфере, т.е. на пять порядков меньше, чем в атмосфере, и на три порядка меньше, чем в живых организмах. Запасы азота в литосфере возможно преувеличены, так как кларк N 0,002 скорее всего характеризует осадочные породы, мощность которых заметно меньше мощности литосферы. Изверженные породы практически не содержат азота в своем составе. Азот осадочных пород, как и углерод, содержащийся в них, своим происхождением связан с тем, что осадочные породы в той или иной степени прошли стадию почвообразования. В почвы азот поступает с отмершими организмами, с их выделениями, в результате образования азотистых соединений в атмосфере при грозах, и, главный источник, в результате фиксации азота атмосферы микроорганизмами, живущими в почве в свободном состоянии (азотобактер и др.) или в симбиозе с растениями (клубеньковые бактерии). В результате грозных разрядов может поступать до 5–10 кг азота на гектар.

Азотификация ежегодно переводит в почву из атмосферы 20–300 кг/га. Поступивший азот усваивается растениями, возвращается в почву и после разложения органического вещества снова усваивается растениями. При этом разложение азотосодержащих органических веществ идет медленнее, чем потеря других веществ, поэтому в детрите содержание азота относительно увеличивается, по сравнению с исходным растительным материалом. Накопление азота в почвах прямо коррелирует с содержанием (накоплением) гумуса в почвах (табл. 44).

В метровом слое почв планеты хранится  $0,21 \times 10^{12}$  г азота. Азот выделяется обратно в атмосферу при разложении растительных остатков, с выделениями животных, в результате процессов аммонификации и денитрификации. Часть почвенного азота потребляется растениями и общее количество этого азота приблизительно равно содержанию азота в растениях.

Аммонификация, нитрификация и денитрификация – относятся к процессам трансформации соединений азота в почвах. Аммонификация – освобождение иона аммония из органических соединений, которые представлены соединениями, содержащими аминокислоты, аммонийный азот, амиды и т.п. (табл. 45). Именно эти соединения, разлагаясь, приводят к появлению в почве иона аммония, который сорбируется почвенным поглощающим комплексом, слоистыми

Содержание различных групп соединений азота в некоторых почвах (кг/га)  
в слое 0–20 см [Д.С. Орлов, 1992]

Группа	Дерново-подзолистая	Типичный чернозем	Серозем	Группа	Дерново-подзолистая	Типичный чернозем	Серозем
Весь азот	3500	9800	3420	Азот аминокислот	400	670	220
Азот аминокислот	425	1010	400	Негидролизующий азот	1080	4340	1400
Аммонийный азот	500	1040	650				

минералами. Почвенные микроорганизмы – нитрификаторы переводят аммоний сначала в нитриты, а затем в нитраты. Превращение в нитриты происходит при воздействии бактерий *Nitrosomonas* и др. В этом случае  $\text{NH}_3$  окисляется до  $\text{HNO}_2$  по схеме:



Окисление азотистой кислоты (и нитритов) в азотную  $\text{HNO}_3$  (и нитраты) происходит под действием микроорганизмов *Nitrobacter*. Нитраты и нитриты легко растворимы и быстро вымываются из почвы. Реакция превращения нитритов в нитраты намного быстрее, чем превращение аммиака в нитриты, поэтому в почве содержатся в основном нитраты. Окисление аммиака идет в окислительных условиях при окислительно-восстановительном потенциале 400–600 мВ. Если в почве создаются восстановительные условия, то идет процесс денитрификации, восстановление нитратов до газов  $\text{N}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ . Процесс денитрификации идет энергично в переувлажненных почвах при температуре 25°C. При этом в воздух может выделяться за вегетационный период до 7,5 кг/га  $\text{N}_2\text{O}$ . Внесение навоза может увеличить эмиссию  $\text{N}_2\text{O}$  в 30–40 раз.

Азот – необходимый питательный элемент, поэтому уровень его содержания в почве определяет продуктивность экосистем наряду с другими факторами. Внесение азота при недостатке воды в почвах аридных регионов способствует повышению продуктивности экосистем и улучшению состояния растений. В то же время избыток нитратов в почвах приводит к увеличению их содержания в грунтовых водах, в продуктах питания, что вредно для здоровья животных и человека. Считается также, что  $\text{N}_2\text{O}$  разрушает озоновый экран планеты. В сельском хозяйстве – азотные удобрения – главное средство повышения урожая.

### Цикл фосфора в биосфере и почве

Изверженные породы содержат в среднем 0,30%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , осадочные – 0,13%, растения – около 1%. Таким образом, запасы  $\text{P}_2\text{O}_5$  в литосфере измеряются  $0,2 \times 10^{17}$  г, живые организмы содержат приблизительно такое же количество фосфора ( $0,2 \times 10^{17}$  г). Такое совпадение означает, что фосфор – один из дефицитных элементов, содержание которого в обычных почвах достаточно низкое. Именно поэтому Ю. Либих предложил в первую очередь под сельскохозяйственные культуры вносить фосфорные удобрения. В живых организмах фосфор входит в липиды, нуклеатиды, АДФ и АТФ и т.д. Он в основном содержится в

**Действие N, P, K на фоне других элементов  
(прибавка урожая по отношению к неудобренному контролю)**

Почва	45 кг/га			120 кг/га		
	N	P	K	N	P	K
Дерново-подзолистая суглинистая	33	24	15	80	56	27
Серая лесная суглинистая	46	25	9	66	28	19
Выщелоченный чернозем	31	30	11	65	52	18
Мощный типичный чернозем	12	23	14	77	41	23
Обыкновенный чернозем	11	26	3	36	23	10
Предкавказский чернозем	7	3	2	5	13	7

семенах растений. В растения фосфор поступает только из почвы. В минеральных субстратах фосфор содержится в апатитах, фосфатах железа и алюминия. Минералами органического происхождения являются фосфориты. При внесении больших доз фосфорных удобрений он часто сносится водой в близлежащие водоемы и происходит их обогащение фосфором и бурное развитие водорослей (эвтрофикация водоемов).

Таким образом, можно отметить, что фосфор в литосфере находится в основном в рассеянном состоянии. В осадочных породах он образует скопления, связанные с деятельностью биоты в предыдущие геологические периоды. Растения и животные концентрируют фосфор и почвы, особенно их верхние гумусовые горизонты, в среднем, богаче фосфором, чем почвообразующие породы. Но при сельскохозяйственном производстве фосфора, как правило, не хватает и внесение его в почву резко повышает урожай. Однако содержание  $P_2O_5$  в почвенном растворе свыше 5 мг/л приводит к тому, что растения выделяют его из организма. Многочисленные географические опыты по эффективности удобрений показали, что наибольшая прибавка урожая отмечается от внесения азота, затем от фосфора и на третьем месте стоит калий (табл. 46).

### Химический состав живых организмов

Средний состав организмов отличается от состава литосферы. В литосфере преобладают кислород (47%), кремний (28%), алюминий (8%), железо (5%). В организмах накапливаются кислород (70%), углерод (18%), водород (10%), азот (0,3%). Биогеохимическая роль растений определяется их потреблением химических элементов.

Растительные и животные остатки, обладающие другим соотношением элементов, чем горные породы, меняют химический состав верхней части породы (почвы). По соотношению элементов можно оценить особенности изменения их концентрации при поступлении из одной системы в другую. В геохимии это отношение называют коэффициентом обогащения. В биологии – коэффициентом биологического потребления. С учетом варьирования в содержании элементов для разных компонентов принято, что отношение 0,7–1,3 характеризует индифферентность компонента экосистемы к этому элементу по сравнению с другим сравниваемым компонентом. Отношение  $< 0,7$  показывает, что данный элемент в меньшей степени используется данным компонентом. Так, в почвах на карбонатных породах содержится значительно меньше Ca, Ba, чем в подстилающих породах.

В растениях по сравнению с почвами заметно ниже концентрация F, As, Cd. В то же время в почвах по сравнению с литосферой и осадочными породами концентрируются Be, S, Cr, Zn, As, Mo, Ag, Sb, Sn, I, Cs, Au, Br. В растениях по сравнению с почвами накапливаются Na, Mg, K, Ca, Mn, Co, Cu, Zn, Rb, Mo, Ag, I, в еще большей степени B, P, S, Br, Cs и особенно концентрируется Au. Таким образом, биогеохимическая работа растений четко появляется по накоплению ассоциации элементов. Поэтому, обогащение прослойки породы этими элементами и обеднение F, Na, Mg, Cl, K, Ca, Cu, Rd, Hg, Pb, U свидетельствует о том, что данная порода прошла фазу почвообразования.

Сравнение коэффициентов обогащения (биологического поглощения) растений по отношению литосфере и почве показывает, что растение “запускает” в трофическую сеть повышенную концентрацию таких элементов, как Na, Mg, K, Ca, Cu, B, P, S, Br, Cs, Au. Замедленно, согласно литосферному кларку, поступление в растения Cl, Cr, Ni, Sr, Ba, Pb.

### Влияние подстилки на почву

Как указывалось выше, часть созданного растениями органического вещества превращаются при поступлении опада на почву в подстилку. Влияние подстилки на почву может быть прямым и косвенным. Косвенное определяется воздействием подстилки на другие факторы почвообразования (состав растений, микроклимат, включая ход температуры и т.п.) К прямому воздействию подстилки на почву следует отнести мульчирование почвы и снижение испарения из верхних слоев почвы, выравнивания хода температуры в почве, участие в формировании почвенного профиля почвы, включая гумусовый профиль, кислотность почвы, состав обменных катионов. Отмечается высокая корреляция ( $0,90 \pm 0,03$ ) между запасами подстилки и содержанием гумуса в слое A1 в дерново-подзолистых почвах ельников южной тайги. Еще выше корреляция ( $0,95 \pm 0,03$ ) в этих почвах между содержанием фульвокислот и запасами подстилки. Зато практически отсутствует корреляция между запасами подстилки и содержанием гуминовых кислот и их фракций в этих же почвах.

Для подстилки часто характерны более высокие значения pH, (5–6), чем для гор. A1 и A2 (4–5). Этот факт доказывает, что подкисление почв связано не прямо с органическими кислотами, поступающими в почву, а с взаимодействием водорастворимых органических веществ (в том числе и органических кислот) подстилки с минеральной матрицей почвы. (табл. 47).

У ствола растворы обычно более кислые, чем под кроной и в окнах. В определенной степени у pH отмечается отрицательная корреляция с содержанием углерода в водах: чем выше концентрация, тем ниже pH (табл. 48).

По исследованиям Никвиста у свежеснявшего опада в течение первого месяца в условиях Швеции теряется до 20% его массы в результате вымывания. По данным Э.Ф. Ведровой в почву из подстилки в лесостепи за летние месяцы поступает около 20–30 кг/га C, 9–12 кг Ca, 2–7 кг Mg, 1–5 кг Si. Приведенные цифры говорят о порядке величин. Водные вытяжки из подстилки (при соотношении размолотая подстилка: вода 1:5) подтверждают достаточно хорошую подвижность многих веществ, составляющих подстилку (табл. 49). В этом случае количество этих веществ заметно превышает естественную их подвижность, но на основании этих анализов можно судить о роли фактора увлажнения в изменении состава подстилки.

В таежной зоне интенсивность выноса и подкисления почв еще выше.

Наряду с кислотами, соединениями кальция, магния, калия, фосфора и азота в почву поступает органическое вещество. Оно имеет хорошо выраженную

Таблица 47

Динамика pH в лизиметрических водах под подстилкой в сосновых насаждениях на темносерых суглинистых(1) и дерново-боровых супесчаных (2) почвах [по данным Ведровой, 1980]

Место	21 июня		5 июля		12 августа	
	1	2	1	2	1	2
У ствола	5,2	4,9	6,6	6,7	6,2	6,0
Под кроной	6,4	6,3	7,6	7,3	7,1	6,8
Окно	6,8	6,7	7,6	7,0	7,4	7,2

Таблица 48

Содержание углерода (мг/ 100мл) в лизиметрических водах под подстилкой в насаждениях сосны на темно-серой лесной почве (1) и дерново-боровой супесчаной (2) [по данным Ведровой, 1980]

Место	3 июня		24 июня		6 июля	
	1	2	1	2	1	2
У ствола	19	21	13	12	10	7
Под кроной	6	5	5	7	4	4
В окне	2	2	3	2	3	2

Таблица 49

Состав водной вытяжки из подстилки сосняка на темно-серой лесной (1) и дерново-боровой (2) почвах (мг/100г сухой массы подстилки)

Тип почвы	pH	C	Ca	Mg	K	Тип почвы	pH	C	Ca	Mg	K
1	5,6	577	46	12	28	2	5,6	796	53	13	49

Таблица 50

Участие основных компонентов лесного полога сосняка осочково-орлякового в мобилизации железа (на 1 га) [по данным Ведровой, 1980]

Источник	Площадь влияния, м <sup>2</sup>	Водорастворимого С, кг/га	Fe <sup>3+</sup> , мг/г С		Fe <sup>3+</sup> , г/га	
			Восстановленно	Комплекс	Восстановленно	Комплекс
Ствол	88	1,6	41	18	68	30
Крона	6548	45	73	57	3325	2610
Подстилка	10000	27	11	24	297	648

способность восстанавливать  $Fe^{3+}$  в  $Fe^{2+}$  и образовывать с железом комплексные соединения, легко мигрирующие в почве (табл. 50).

Эта функция органического вещества экосистемы пока плохо учитывается в теории почвообразования. Классики почвоведения придавали большое значение передвижению органического вещества в почвах под действием органического вещества. Оподзоливание совершенно справедливо связывали с действием органического вещества как восстановителя на железо почвенных соединений.

### **Другие функции растений в почвообразовании**

Кроме изменения химического состава породы и накопления гумуса, растения создают систему анизотропности почв (вместе с животными): систему почвенных горизонтов и изменение этих горизонтов по горизонтали от эдификатора растения. У стволов деревьев обычно рН ниже, а запасы подстилки и содержание гумуса выше, чем под кроной. Растения изменяют свойства почв, агрегируют почву, увеличивают порозность почв по сравнению с почвообразующей породой. Разные растения и ассоциации растений по-разному преобразуют почвенный материал. Особенно хорошо это можно оценить при анализе лесных почв, воздействию на которые растений измеряется десятилетиями и столетиями. Растения изменяют водный режим почв, в частности, водный баланс. Во-первых, растения потребляют до 200 мм воды из почвы и, во-вторых, задерживают до 30% осадков, идущих на смачивание растительного полога. Таким образом, определяющее влияние растений на почву можно считать вполне доказанным.

## *Глава 11*

### **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ЛЕСНЫХ ПОЧВ**

Почвенный покров нашей планеты в настоящее время так изменен, что естественные процессы почвообразования и эволюции почв можно наблюдать лишь в тундре, лесах и ряде пустынь. Учитывая, что тундровые и пустынные почвы часто не имеют полноразвитого профиля и развиты в экстремальных климатических условиях, можно принять, что именно лесные почвы – то естественное множество почв, изучение которого позволяет выявить генезис и эволюцию почв, а также в полном объеме их экологические функции. Именно поэтому к лесным почвам сейчас привлечено внимание почвоведов и изучение этих почв идет самым широким фронтом.

Многообразие экологических функций можно свести, для удобства, к нескольким группам, к таким, как снабжение растений питательными веществами и водой, разложение останков живых организмов, включая грибы, микроорганизмы, растения, животные и превращение их в почвенный гумус, нейтральный по отношению к растениям, а иногда даже обладающий стимулирующим воздействием, и окисление органического вещества до  $CO_2$ . Третья группа функций – обеспечение места поселения живых организмов. Указанные группы включают достаточно самостоятельные экологические функции, как, например, снабжение растений азотом, калием, фосфором, другими элементами – они осуществляются разными механизмами, и поэтому их следует считать самостоятельными экологическими функциями. Различаются также механизмы накопления этих веществ в верхних слоях почвы, хотя по инерции эти механизмы рассматриваются в рамках одного общего биологического круговорота. Достаточно сказать, что

накопление азота в почве – биологический, закрепление фосфора – химический и калия – физико-химический процессы. Если почвы отличаются по минералогическому и гранулометрическому составам, водному режиму, содержанию растворимых солей, функции снабжения растений питательными элементами будут существенно разными. Естественные почвы обладают всем набором экологических функций, что выработалось за время эволюции биосферы (экосистем). Следует отметить одну очень важную особенность почвы: в случае невозможности выполнять в полном объеме какую-нибудь экологическую функцию, почва передает эту функцию, “делегирует” ее другому горизонту: дернине, кустарничково-корневому (лесной аналог дернины), торфу и моховому очесу. Так, кварцевые пески, бедные от природы питательными веществами часто в гумидной зоне зарастают сфагнумами и образуют сфагновые болота. В этих горизонтах распространена большая часть корней растений, в том числе деревьев. Часто эти горизонты становятся “домом” других организмов (растений, животных, микроорганизмов). Аналогичная ситуация отмечается на почвах с многолетней мерзлотой или с длительносезонным промерзанием почвы: образуются органогенные горизонты (та же дернина, кустарничково-корневой), которые прогреваются быстрее и способствуют более раннему началу жизнедеятельности живых организмов. Следует отметить один очень своеобразный факт: органогенные горизонты обычно очень плотно заселены микроорганизмами, мезофауной и чем больше мощность подстилки или аналогичного органогенного горизонта, тем больше в них живых организмов. Очевидно, разложение опада, подстилки, корней нельзя прямо связывать с заселением (населением) этих горизонтов. А сам процесс разложения подстилки сложнее и в этом необходимо разбираться особо. Работы Т.С. Всеволодовой – Перель [1987] показали, что педофауна переводит материал опада и подстилки в органические агрегаты, с зольностью 7–10%, т.е. практически сохраняет их органическую природу. При этом теряется лишь 3–4% органического вещества. Таким образом, многочисленное население подстилки поддерживает существование этого горизонта, а не уничтожает его, как это принято считать в настоящее время. Чем больше население подстилки, тем длиннее трофическая цепь в ней, тем дольше она сохраняется, как особое образование на поверхности почвы. Но это положение нуждается в дальнейшем исследовании.

Деградация почв – это полная или частичная потеря ею своих экологических функций, отсутствие горизонта (дернины, подстилки, органогенного), которому можно передать эти функции. В этом случае деградирует также экосистема, развивавшаяся на этой почве. Особенно четко это положение просматривается при анализе лесных почв и лесных экосистем.

Лесные почвы распространены во всех природных зонах от тундры до пустыни, но доля их участия существенно различается, как разнятся и сами лесные экосистемы.

В тундре – леса, как многолетние “лубяные” экосистемы, представлены карликовыми формами берез, ив, восточнее Байкала кедровым и ольховым стланиками, в Европе – сосновым стлаником. Для почв (в основном, разные подтипы подбуров) этих экосистем характерен органогенный горизонт Акк, кустарничково-корневой.

Таежные леса достаточно хорошо исследованы и составляющие их хвойные и смешанные экосистемы оценены с большой детальностью самыми разными специалистами. Для них характерны подзолистые, дерново-подзолистые, бурые лесные, дерново-лесные и др. почвы.

Также хорошо изучены лиственные леса с их бурыми лесными и серыми лесными почвами.



В зоне черноземных степей широколиственные леса распространены по балкам (байрачные леса). Они растут на черноземах и серых лесных почвах. Кроме того в этой зоне на песчаных дерновых почвах формируются сосновые экосистемы.

Похожая картина в зоне сухих степей: в балках дубовые леса на лугово-каштановых почвах, на песчаных дерновых почвах – сосняки.

В зоне пустынь на сероземах формируются саксауловые леса, под которыми образуются в результате поступления солей с опадом щелочные круги, обогащенные растворимыми солями.

В субтропиках распространены хвойные (сосновые, можжевельниковые) и лиственные (букковые, дубовые, грабовые) на бурых лесных и коричневых почвах, а также красноземах и ортштейново-оглеенных почвах.

Саванны и дождевые тропические леса дополняют эту глобальную картину распределения лесов с достаточно разнообразным набором древесных пород и почв.

Есть ли какие-нибудь свойства, которые могли бы объединить лесные почвы в одну общность? Анализ, проведенный Н.С. Орешкиной [1983], показал, что все лесные почвы по сравнению с аналогичными пахотных и травяных угодий обладают более низкими плотностью, сопротивлением расклиниванию, более высокой водопроницаемостью. В гумидных условиях лесные почвы более обогащены обменным алюминием и обменным  $\text{NH}_4$ , чем почвы пашни и луга.

Обращает на себя внимание различие в гумусированности почв. В богатых почвах (черноземы) гумусированность под лесом верхнего 30-см слоя выше, чем на целине и тем более на пашни. В то же время в дерново-подзолистых почвах верхний слой под суходольным лугом заметно богаче гумусом, а пахотный беднее гумусом, чем почва под лесом (табл. 51 и 52).

Плотность при сведении леса увеличивается иногда до глубины 40–50 см (в дерново-подзолистых почвах).

Под лесом почвы всегда обладают заметно более высокой водопроницаемостью, чем под лугом и в поле. При этом в лесах наибольшая неоднородность водопроницаемости (коэффициент вариации – 160%, у почв луга – 100%, в почвах поля – 70%). Безусловно, роль такой неоднородности водопроницаемости в лесу чрезвычайно важна. Высокие значения водопроницаемости, которых больше в лесу, приводят тому, что в лесных почвах практически нет эрозии. В поле для водопроницаемости свойственно некоторое выравнивание значений, что характерно вообще для антропогенного влияния, приводящего к снижению биоразнообразия в данном ландшафте.

Изменение удельной поверхности почв отражает элювиальные процессы, припахивание нижних горизонтов, накопление или сработку гумуса.

Возможно, что изменение удельной поверхности связано с трансформацией минералов, коллоидов, накоплением или разрушением самых тонких фракций элементарных частиц, которое не обнаруживается при гранулометрическом анализе, но фиксируется по изменению удельной поверхности почвы.

Вторая особенность лесных почв, характерная для всех природных зон, – особая анизотропность почв в лесных экосистемах, связанная с воздействием биогеоценотического поля эдификатора парцеллы (окна, дерева) на почвенный покров. Она проявляется в закономерном изменении запасов подстилки, перераспределении осадков, часто в микрозональности растительного покрова вокруг ствола дерева или центра лесного окна. Проявляется эта особенность в той или иной степени на всех лесных почвах, суглинистых и песчаных, таежных и почв широколиственных лесов, но, безусловно, выраженность анизотропности в разных почвах различается.

Таблица 51

**Свойства разных почв под лесом, целиной и пашней [Орешкина 1983],  
значения из 16–100 повторностей**

Тип угодья	Глубина, см	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Плотность твердой фазы, г/см <sup>3</sup>	Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>
<b>Дерново-подзолистая почва, Малинки, Московская обл.</b>				
Сосняк	0–5	79	2,59	1,12
	5–10	47	2,63	1,28
	15–20	45	2,64	1,35
	25–30	49	2,66	1,43
	45–50	83	2,70	1,50
Ельник	5–10	53	2,57	0,66
	15–20	43	2,64	0,97
	20–30	37	2,64	1,21
Березняк	5–10	120	2,57	1,14
	15–20	42	2,61	1,32
	25–30	42	2,65	1,48
Пшеница	45–50	70	2,69	1,56
	5–10	47	2,60	1,44
	25–30	58	2,63	1,56
	45–50	62	2,67	1,65
<b>Чернозем типичный, Курск</b>				
Целина	0–5	120	2,49	0,80
	15–20	117	2,59	1,02
	45–50	106	2,63	1,08
	75–80	108	2,64	1,09
	105–110	92	2,67	1,11
Лес	0–5	141	2,48	0,76
	15–20	123	2,61	1,03
	45–50	115	2,63	1,10
	75–80	107	2,63	1,12
	105–110	104	2,67	1,14
Пшеница	0–5	112	2,59	0,94
	15–20	114	2,59	1,05
	45–50	105	2,62	1,06
	75–80	100	2,65	1,09
	105–110	91	2,66	1,12
<b>Серозем, Узбекистан, Голодная степь</b>				
Целина	0–5	38	2,67	1,21
	5–10	35	2,66	1,26
	25–30	33	2,70	1,33
	35–60	30	2,69	1,27
	95–100	41	2,69	1,28
Лесополоса	0–5	97	2,54	1,03
	5–10	39	2,69	1,23
	35–60	39	2,70	1,35
	95–100	40	2,71	1,37
Хлопчатник	5–10	42	2,69	1,37
	15–30	43	2,71	1,42
	55–60	37	2,72	1,38
	95–100	41	2,73	1,41

Таблица 51 (окончание)

Тип угодья	Глубина, см	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Плотность твердой фазы, г/см <sup>3</sup>	Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>
Таежные осолоделые [Горбачев, 1985] Иркутская обл.				
Сосняк	5–10	39		
	15–20	29	2,61	
	35–40	31	2,66	
Ельник	5–10	103	2,68	
	15–20	27	2,55	
	35–40	59	2,65	
Березняк	5–10	87	2,70	
	15–20	60	2,57	
	35–40	65	2,68	

Таблица 52

## Средние оценки свойств почвы (слой 0–30 см) в зависимости от экосистемы

Тип угодья	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Пористость, % объема	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Скорость впитывания, мм/мин	Гумус, % массы
	почвы	тв. фазы				
Дерново-подзолистая почва						
Луг	1,37	2,64	48		2	3,4
Лес	1,19	2,62	54	46	130	1,1
Поле	1,47	2,62	44	54	17	не опр.
Черноземы типичные						
Целина	1,08	2,62	56	114	68	4,5
Лес	1,05	2,59	58	94	148	5,4
Поле	1,17	2,65	54	91	83	2,9
Таежные осолоделые [Попова, 1983]						
Лес	1,18	2,63	55	57		4,0

Анализ показывает, что свойства почв в лесу закономерно связаны с типом парцеллы, микрозоной, травяным ярусом (табл. 53). Эту связь можно оценить, используя формулу Шеннона, и на основании ее выделить специфические значения свойств почв в зависимости от фактора.

Такая анизотропность в той или иной степени свойственна всем лесным почвам, но иногда она затушевывается разными другими влияниями (высокой полнотой древостоя, рекреационным воздействием, влиянием животных, вывалов, историей парцеллы, других случайных факторов). В зависимости от сенсорности почв и их рефлекторности она может проявляться или очень ярко или в неявной форме как тенденция. Хорошо заметна она обычно в верхних горизонтах почвы, в запасах и мощности подстилки, в содержании гумуса в гор. А1, сумме и составе обменных катионов в этом же горизонте. В горизонте В влияние современного БГЦ обычно менее заметно, а закономерное изменение свойств в пределах тессеры в этом горизонте уже обычно не прослеживается. Очевидно, анизотропность – влияние современного БГЦ.

Таблица 53

Специфические значения содержания обменных катионов (мг-экв/100г) в зависимости от биогеоценологических факторов в слое 0–50 см среднесуглинистой дерново-подзолистой почвы

Параметр	Сумма катионов	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Параметр	Сумма катионов	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>
Горизонты					Микрозона вокруг эдификатора				
A1	21	11	1–2	1–2	1-я	15–17	3–7	1–2	5
A1A2	11	3	1	3–4	2-я	21–26	7–14	5	10
A2	6	1	1	5	3-я	4	14	3–4	1–2
A2B	7–14	1–6	3–4	6–7	Доминанты напочвенного покрова				
B	15–20	7–14	3	8	Осока волосистая	14	3	1	1–4
Порода дерева									
Ель	21	4–6	3–4	1–4	Зеленые мхи	1–18	11	3	8
Дуб	15–17	4–10	1	6–7	Снытьевое разнотравье	15–17	1–6	1–2	3
Береза	7–11	1	1	8–10					
Осина	7–11	1–3	1–4	8–10	Хвощ	7–11	4–6	3	3–4
Липа	21	14	5	1–2					
Сосна	18–20	1–3	–	5	Мертвопокровная	8–12	4–5	1–2	5–7
Окно	11	7–10	1–2	5					

Приведенные данные ставят перед исследователями вечный вопрос: что раньше, яйцо или курица. Отмеченные свойства почвы послужили причиной появления данных экосистем, или сами экосистемы создали эти условия, изменив свойства почв в “нужном” направлении. Ясно, что почвы пашни изменены человеком, исходя из его понимания экологических требований сельскохозяйственных растений. Создан достаточно рыхлый, но не вспушенный пахотный слой с плотностью около 1, в него внесены удобрения, если надо – известь и пр. Экологическое соответствие пашни культуре проверяются по величине урожая (реже – по его качеству). Но в течение вегетационного периода при отсутствии обработки пашня переходит в равновесное состояние, плотность почвы увеличивается, водопроницаемость несколько снижается, иногда меняется агрегированность. Под зерновыми почва приобретает свойства близкие к свойствам луговых (дерновых) почв. В естественных экосистемах ситуация несколько иная, особенно это касается лесных экосистем. При их поселении действует правило, сформулированное А.Л. Бельгардом и А.П. Травлевым [1990], – экологическое соответствие экосистемы природным условиям. Одним из важных экологических свойств почв, определяющих существование лесных экосистем – следует считать ее водный режим. Если в почве есть запас продуктивной влаги во втором метре в течение вегетационного периода, то лесная экосистема может существовать на этой почве. В противном случае при достижении определенного возраста экосистема погибает. [Карпачевский, Травлеев, 1991; Карпачевский и др. 1995]. Следует различать также две группы экологических функций почвы, которые, возможно, связаны с

Специфические свойства гор. А1 дерново-подзолистой почвы под разными растениями  
[Бганцова 1991; Серова, 1983]

Растение	Плотность почвы, г/см <sup>3</sup>		Водопроницаемость, мм/мин	рН почвы	Обменные катионы, мг-экв/100г	
	пределы	средняя			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Костяника	0,5–1,1	0,80	0–75	4,6–4,9	3–5	1–2
Кислица	0,5–1,1	0,71	25–200	4,3–4,6	1–3	1–2
Хвощ лесной	0,7–1,1	0,85	25–150	3,4–5,5	3–5	6–7
Копытень	0,7–0,9	0,88	0–100	4,6–5,5	7–13	1
Осока волосистая	0,4–1,1	0,65	75–150	4,0–4,6	5–7	0–2
Щитовник Линнея	0,3–0,8	0,61	0–150	4,6–5,2	1–3	–
Папоротник мужской	0,5–0,9	0,70	0–150	4,0–5,2	3–5	4–5
Ландыш	0,3–0,5	0,4	–	–	11–15	3–4
Живучка	0,6–0,7	0,65	25–50	4,9–5,2	–	–
Сныть	0,4–0,5	0,45	25	4,0–4,3	–	–
Мертвопокровная парцелла	0,3–0,5	0,40	125–150	4,0–4,3	–	–

экологическими функциями климата. На данной почве (например, черноземах) посаженные ели образуют своеобразную экосистему, прекрасно растут, но не возобновляются. Аналогично ведут себя лесные полосы в сухой степи. Очевидно, что свойства почв (органогенные функции их) достаточно хороши для произрастания деревьев, которые в необходимом количестве снабжаются водой и питательными элементами. Однако лесовозобновительные свойства (экологические функции) неблагоприятны для лесных экосистем. В то же время доказано, что искусственные насаждения в степях изменяют свойства исходных почв (в основном, верхних горизонтов): уменьшают плотность, увеличивают водопроницаемость, содержание гумуса. В степях лесные полосы накапливают снег и весной почва промывается иногда до глубины 4 м по сравнению с 1–2 м под травяными экосистемами и на пашнях. То есть и в этом случае лесные экосистемы создают определенные экологические условия для своего существования, изменяют экологический тип водного режима [Воронин и др., 1992].

Аналогичная картина прослеживается и в лесной зоне. Поселившаяся на данной почве древесная порода изменяет свойства почв в “нужном для себя” направлении. О том, что этот процесс идет, говорит факт анизотропности лесных почв, закономерного изменения их в пределах тессеры (от ствола дерева к границе кроны). Об этом же свидетельствуют различия в свойствах почв под разными парцеллами, что также можно объяснить только тем, что парцеллы изменяют почвы в определенном направлении. Многочисленные исследования позволили выявить общие закономерности изменения свойств почв в лесах в зависимости от разных биогеоценотических факторов. Под разными древесными породами, разными растениями напочвенного яруса, на разном удалении от дерева просматриваются различия в таких свойствах почв, как, например, содержание и состав обменных катионов, гумус, рН, динамика почвенных свойств. Поскольку каждое растение развивается в определенных пределах значений любого свойства, а эти амплитуды частично перекрываются, то вероятностную приуроченность растений и почв по определенным свойствам нельзя считать исходной. В любом случае растения на фоне варьирования общих величин почвен-

Таблица 55.

**Плотность и поры разного диаметра в гор. А1 дерново-подзолистой почвы под разными растениями, % общего объема пор [Бганцова, 1991]**

Растение	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Пористость, %	Диаметр пор, мм					
	почвы	тв. фазы		>0,3	0,3–0,15	0,15–0,1	0,1–0,06	0,06–0,04	0,04–0,03
Хвощ лесной	0,67	2,44	72,4	11,3	4,1	2,8	2,9	3,3	2,7
Живучка	0,63	2,47	74,5	6,5	4,7	3,3	2,8	2,6	2,0
Сныть	0,55	2,43	77,4	9,2	3,8	1,8	2,4	1,9	–
Кислица	0,68	2,39	71,7	7,9	3,2	2,7	3,9	3,8	3,3
Копытень	0,71	2,52	71,8	18,1	2,6	2,1	2,3	2,4	2,9
Папоротник муж.	0,55	2,36	76,6	12,4	2,1	1,5	2,3	1,9	3,2
Костяника	0,67	2,41	72,3	10,0	4,5	4,3	2,6	2,9	2,9
Осока волосистая	0,87	2,40	63,9	5,4	3,9	3,1	3,6	3,6	2,9
Щитовник Линнея	0,74	2,40	69,0	13,5	4,1	4,1	3,2	3,2	3,3

ных свойств формируют почвы с более узкими пределами колебания этих же свойств. Это положение подтверждается многолетними наблюдениями за связью почвенных свойств и растений травяного яруса [Бганцова, Орехова, Демченко; табл. 54, 55).

В этих работах было показано, что изменчивость ряда почвенных свойств по годам остается в пределах, специфичных для данного вида растений. Это относится к рН, содержанию гумуса, плотности, распределению пор по размерам. Выявляется следующая общая картина: общий набор свойств дерново-подзолистой почвы способствует поселению растений определенного вида. В зависимости от конкурентного успеха в данной точке лесной экосистемы выживает определенное растение, которое уже затем начинает “улучшать” почву в соответствии со своими требованиями. Иными словами, поселение растений, попадание семян в данную точку леса – случайность, но если свойства почвы больше экологически содействуют данному растению, чем его конкуренту, то данное растение занимает эту точку пространства и изменяет уже саму почву в “нужном” для самого растения направлении.

Разнообразие естественных экосистем и связанное с ним разнообразие свойств почв свидетельствуют, что в пахотных почвах так или иначе, но часть экологических функций подавлена, они упрощены и требуется вмешательство человека, чтобы поддерживать искусственную экосистему на должном производственном уровне. Анализ также показывает, что лес богаче в проявлении экологических функций, чем травяные экосистемы, так как в нем осуществляется поддержание роста деревьев, кустарников, травяного яруса, мохового, многочисленного и разнообразного животного мира. Для леса характерны не только сукцессии БГЦ, но и внутри типа леса, которые проявляются в смене видов напочвенного покрова в данной точке парцеллы, смене парцелл, перемещения тессер. Именно поэтому изучение лесов и лесных почв как экологически многофункциональных экосистем очень перспективное направление биогеоэкологических исследований. В настоящее время именно в лесах экологические функции раскрываются наиболее ярко и в полной мере.

Очевидно, что развитие растений сопряжено с экологическим их соответствием своему местообитанию. Если нет соответствия, то растение даже не взойдет или

погибнет в юном возрасте. При неполном соответствии – через какое-то время растение начнет болеть. При полном соответствии – растение растет нормально.

Также следует отметить, что в лесных экосистемах часть экологических функций почвы делегируется подстилке и другим органометным горизонтам, что можно считать характерной чертой значительной части лесных почв.

## Глава 12

### К ОРГАНИЗАЦИИ СВОЙСТВ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПОД ЕЛЯМИ

После серии работ Л.О. Карпачевского постепенно сложилось представление, что почвенный покров в лесных биогеоценозах имеет сходство с сотовой структурой, элементами организации которой являются ячейки – тессеры. В пределах тессер от их центра к периферии свойства почв закономерно меняются, образуя концентрические структуры. Факторами, определяющими такую организацию, выступают отдельные деревья с их фитогенными полями или центры окон в кронах деревьев.

При всей логичности такой модели и наличии фактических материалов, ее подтверждающих, есть основания считать, что модель тессеры – скорее идеал, чем реальность, обнаруживаемая в лесных экосистемах.

Возникновение в почвенном покрове подобной организованности возможно при условии, что свойства почв изменяются в соответствии со складывающейся структурой древостоя за время жизни отдельных деревьев, но далеко не все свойства оказываются столь лабильными, чтобы за относительно небольшой срок это произошло. К тому же воздействие на почву происходит по преимуществу с поверхности, а это означает, что с увеличением глубины должны снижаться интенсивности воздействий и возрастать время, необходимое для заметного изменения свойств.

Кроме того, результат организующего воздействия фитоценоза должен зависеть от исходной организованности почвенной массы, на которую накладывается воздействие древостоя. Можно думать, что если бы лес поселился на изначально гомогенизированном минеральном субстрате, то рисунок формирующихся тессер был бы, по-видимому, отчетливо виден. Однако почвенное пространство всегда неоднородно как по вертикали, так и вдоль земной поверхности, и не только в масштабах тессер. И существующий фитоценоз оказывает свое организующее воздействие на почвенный покров, уже преобразованный предыдущими поколениями деревьев и другими компонентами биотического сообщества и “записавший в своей памяти” как пространственную структуру их воздействий, так и их направленность, силу и продолжительность.

Но даже, если допустить, что в лесных биогеоценозах тессеры возникают как результат воздействия крупных эдификаторов, и для этого вполне достаточно времени жизни одного поколения деревьев, то уже второе поколение должно “ломать” ранее созданные тессеры и на их месте создавать новые. При этом в разных местах почвенного покрова однотипные процессы должны происходить на разных исходных фонах. Для второго поколения деревьев периферийные зоны подкоронового пространства могут приходиться на участки почвенного покрова, в предыдущем поколении занимавшие и приствольные, и более

удаленные от стволов деревьев пространства. Нетрудно догадаться, что организованность свойств в почвенном покрове при этом не будет идеальной. Тем более сомнительной может оказаться выраженность тессер, сформированных древостоем на почвенном покрове, прошедшем длительную историю своего развития под влиянием воздействия многих поколений деревьев, нередко с перерывами, связанными с хозяйственной деятельностью человека.

Наконец, формирование тессер в идеальном случае предполагает, что от их центра вдоль осей разного направления характер воздействия эдификатора является однотипным и равновеликим. Но это далеко не так, поскольку, во-первых, сомнительно, чтобы направления на север, юг и любые другие были равноценны. К тому же во многом характер воздействий на почву должен зависеть от розы ветров в разные сезоны года и от распределения осадков в эти же периоды времени. В этих условиях тессеры даже при их формировании на идеально выровненном субстрате должны быть асимметричными и иметь размытые границы.

С учетом высказанных соображений можно с большой долей уверенности утверждать, что тессеры в лесном биогеоценозе не могут быть отчетливо выраженными и они скорее всего должны проявляться только в верхней части почвенной толщи и лишь для наиболее лабильных свойств. Но независимо от выраженности тессер и длительности их существования, они несомненно представляют интерес как структуры в почвенном покрове, в которых записывается история текущей жизни почв и почвенного покрова. Поскольку новые “записи” практически всегда идут по ранее сделанным, использование функции памяти почв для реконструкции истории ландшафтов и процессов почвообразования возможно лишь в условиях, когда есть ясность, какими свойствами тессеры себя обнаруживают и в каких частях профиля почв, насколько быстро и пространственно определенно могут формироваться тессеры, где (в каких горизонтах или на каких глубинах) и что (какие свойства) несет информацию о более ранних периодах жизни конкретного участка земной поверхности. Именно поэтому организация почвенного покрова в пределах небольших площадей заслуживают более детального изучения.

Следует заметить, что в своем большинстве исследования, позволившие выявить закономерную изменчивость свойств почв как функцию удаленности от стволов деревьев, проводились вдоль некоторых линий, а не на площадях, соизмеримых с размерами возможных тессер. Поэтому тезис о концентричности структуры тессер оказался слабо обоснованным.

Исследования пространственной организации почвенного покрова проводили в 1992 г. вблизи “Чашниково”, Учебно-опытного почвенно-экологического центра МГУ им. М.В. Ломоносова (Солнечногорский район Московской обл.). Физико-географические условия и почвенный покров района исследований хорошо известны.

Объект исследования располагался в двух км к юго-западу от “Чашниково” в условно-коренном ельнике-кисличнике с елями 150–200-летнего возраста. В подлеске встречаются рябина (*Sorbus aucuparia* L.), малина (*Rubus idaeus* L.), лещина (*Corylus avellana* L.), бузина (*Sambucus racemosa* L.), жимолость (*Lonicera hallasii* Ledeb.), а подрост представлен елью (*Picea abies* (L.) Karst.), кленом (*Acer platanoides* L.), осинкой (*Populus tremula* L.). Травяно-кустарничковый ярус включает 18 видов, среди которых доминируют кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), зеленчук желтый (*Galeobdolon luteum* Huds.) и щитовник игольчатый (*Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P. Fuchs.). Моховой покров практически отсутствует.

Исследования проводили на участке в форме правильного шестиугольника, каждая сторона которого имела протяженность 7 м. Расстояния между старыми елями в пределах этого участка составляли 5–8 м. Наличие хорошо развитых нижних ветвей у старых елей позволяет утверждать, что на данном участке ле-



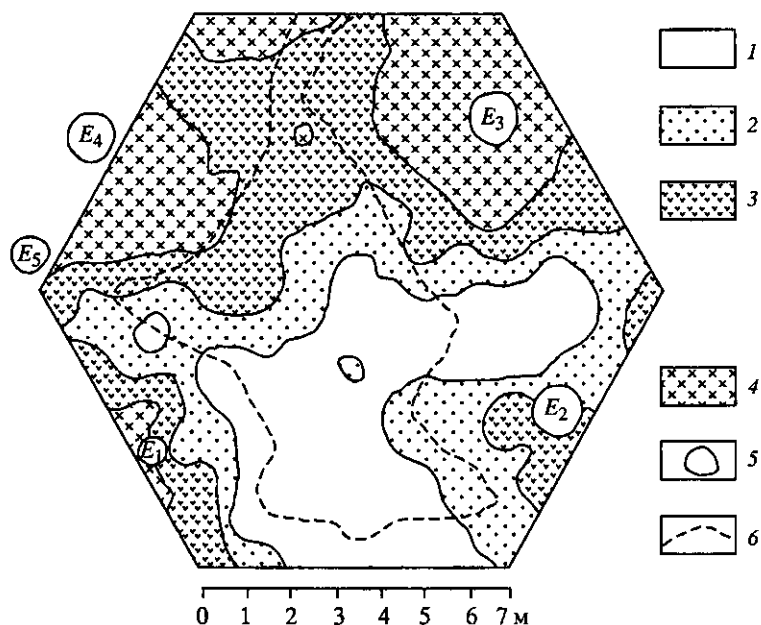


Рис. 26. Рельеф, размещение деревьев и проекция крон на изучаемом участке

1–4 – значения высотных отметок: 1 – менее нижнего квартеля; 2 – от нижнего квартеля до медианы; 3 – от медианы до верхнего квартеля; 4 – выше верхнего квартеля; 5 – стволы деревьев; 6 – граница проекции крон деревьев

са соотношения и расположение подкروновых площадей и оконного пространства остается практически неизменным достаточно длительное время, а окно имеет естественное происхождение (рис. 26).

При общей выравненности рельефа микрорельеф выражен в виде небольших приствольных повышений и микрозападин с перепадом высот, не превышающим 21 см.

Почвенный покров участка сложен дерново-среднеподзолистыми средне-суглинистыми почвами, сформированными на покровном суглинке. Подстилка имеет мощность от 0 до 5 см, в редких случаях достигая 7 и даже 12 см. По результатам изучения почвенного разреза, заложенного на границе исследуемого участка, в пределах верхней полуметровой толщи под подстилкой выделяются обычные для этих условий горизонты: A1 (0–6 см), A1A2 (6–22 см), A2 (22–29(32) см), A2B (до 43 см), далее гор. B1.

Участок был разбит регулярной сеткой на равносторонние треугольники с длиной стороны 1 м. Образцы почвы массой 80–100 г отбирались по углам сетки в 166 точках буром Измаильского с трех глубин (0–10, 10–20 и 20–30 см) после удаления подстилки. Во всех 498 образцах определили содержания углерода экспресс-методом, pH солевой вытяжки, максимальную гигроскопическую влажность и удельную поверхность почвы по Кутилеку.

### Общие особенности свойств в пределах изученного пространства

Свойства почвенного покрова участка в пределах верхних 30 см обычны для почв подобного рода (табл. 56).

Значения pH по профилю меняются мало, наименьшее значение – в верхнем 10 см слое. Содержание углерода (C) по 10 см слоям в среднем закономер-

Таблица 56

Средние ( $\bar{x}$ ) и дисперсии ( $s^2$ ) свойств на площадке в целом и в пределах отдельных ее частей \*

Свойство	Слой, см	Вся площадка (n = 166)		Приствольная часть (ПР) (n = 22)		Подкороновая часть (ПП) (n = 102)		Окно (ОК) (n = 42)	
		x	s <sup>2</sup>	x	s <sup>2</sup>	x	s <sup>2</sup>	x	s <sup>2</sup>
Н, см		7,7	17,5	11,3	18,4	7,9	16,2	5,3	8,2
С, %	0–10	2,954	2,247	4,016	3,873	3,061	2,132	2,139	0,494
	10–20	0,886	0,157	1,112	0,216	0,890	0,132	0,758	0,149
	20–30	0,334	0,039	0,338	0,026	0,335	0,034	0,331	0,058
УП, м <sup>2</sup> /г	0–10	57,82	215,0	66,07	120,2	59,30	217,8	49,89	161,0
	10–20	40,81	74,5	43,40	60,7	40,31	77,4	40,69	74,1
	20–30	38,30	133,0	34,63	69,3	38,51	157,6	39,69	102,3
МГ, %	0–10	4,74	0,99	5,48	0,87	4,82	1,04	4,16	0,33
	10–20	3,27	0,24	3,35	0,21	3,29	0,25	3,18	0,23
	20–30	3,08	0,74	2,82	0,37	3,09	0,81	3,22	0,76
рН <sub>KCl</sub>	0–10	3,68	0,039	3,48	0,04	3,66	0,03	3,82	0,01
	10–20	3,94	0,006	3,88	0,01	3,94	0,01	3,98	0,00
	20–30	3,91	0,009	3,90	0,01	3,91	0,01	3,93	0,01

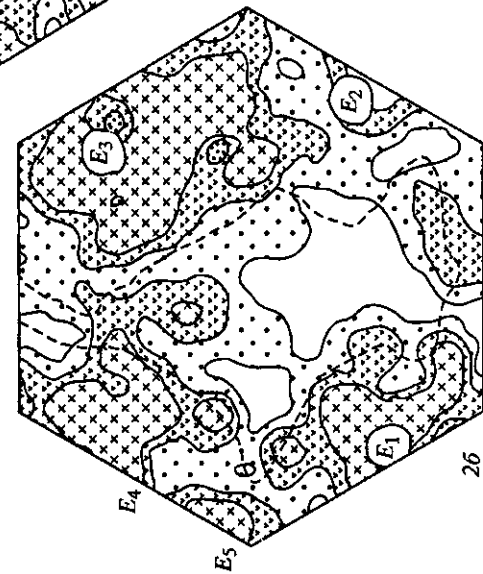
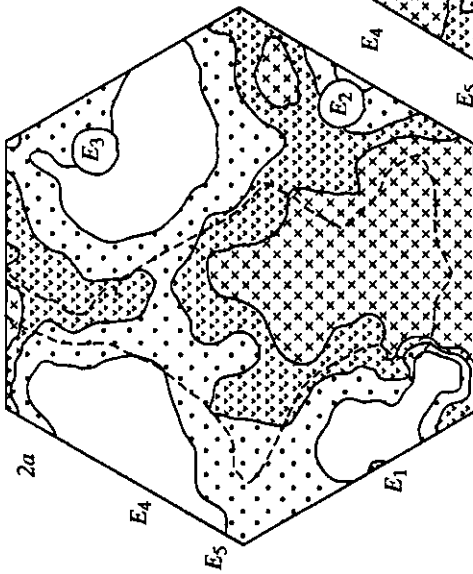
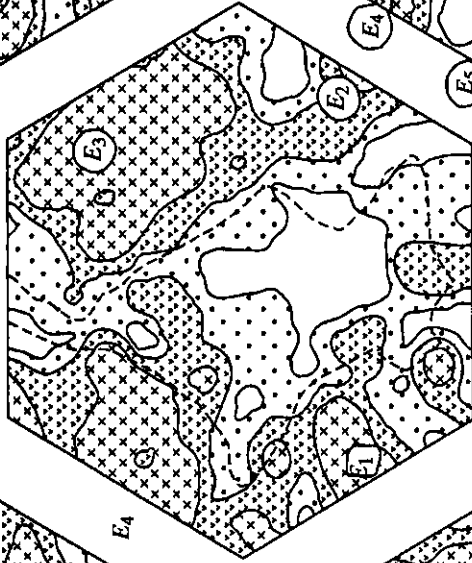
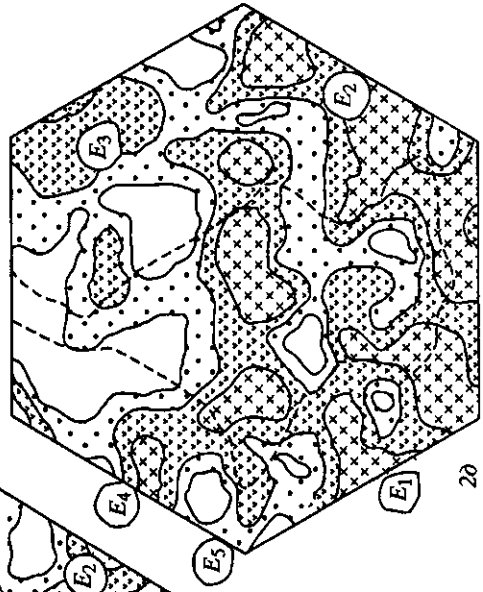
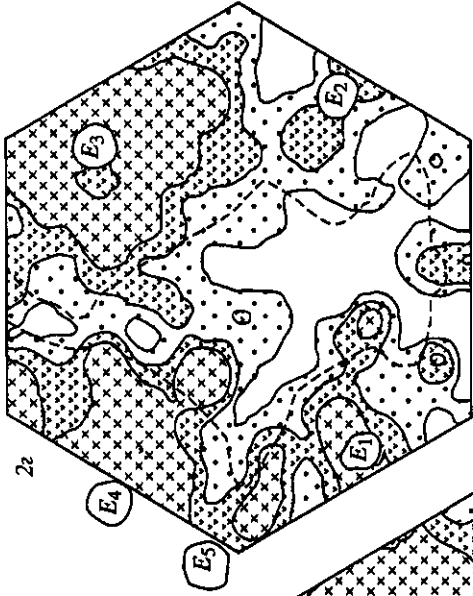
\* Н – высотные отметки точек опробования, С – содержание углерода органических соединений, УП – удельная поверхность, МГ – максимальная гигроскопичность.

но снижается с глубиной от 2,96% в слое 0–10 см до 0,33% в слое 20–30 см. Аналогичным образом ведут себя удельная поверхность (УП) и максимальная гигроскопичность (МГ), но если среднее содержание углерода с глубиной уменьшилось в 8,8 раза, то средние значения УП и МГ снизились только в 1,5 раза (рис. 27).

Несколько иначе ведут себя дисперсии. Если для С дисперсия с глубиной сокращается почти в 60 раз, принимая, как и для среднего, минимальное значение на глубине 20–30 см, то для УП и МГ максимумы дисперсии приурочены к верхнему слою, а минимумы – к слою 10–20 см. Для этих свойств дисперсии меняются по профилю вне связи со средними. Дисперсии УП и МГ в пределах 3 см толщи меняются в 2,9 и 4,1 раза соответственно. Все изменения дисперсий по профилю статистически значимы.

Распределения изученных свойств в пределах отдельных глубин практически все статистически значимо (по критерию хи-квадрат) отличны от нормального.

В пределах верхних 30 см между смежными 10 см слоями связь (табл. 57) по величине как УП, так и МГ практически отсутствует (коэффициенты корреляции Спирмена  $r_s < 0,12$  и статистически незначимы). Это означает, что если какая-либо отличная от случайной организованность в пространственном распределении УП и МГ в пределах отдельных 10 см слоев и существует, то она в смежных слоях независима друг от друга.



Совершенно иначе обстоит дело с С и рН, для которых между соседними слоями имеется не вызывающая сомнений положительная связь, особенно выраженная для рН в верхних слоях (табл. 57).

Между значениями УП и МГ в пределах отдельных слоев существует хорошо выраженная связь. Наибольшее значение коэффициент корреляции Спирмена имеет в верхнем слое ( $r_s = 0,92$ ), наименьшее ( $r_s = 0,78$ ) – в слое 10–20 см. Снижение степени связи в слое с наибольшей выраженностью оподзоливания отчасти, видимо, можно объяснить уменьшением здесь интервала варьирования изучаемых величин (дисперсии для УП и МГ в этом слое в два-три раза меньше, чем в смежных слоях; табл. 56).

Между УП и содержанием углерода коэффициент корреляции  $r_s$  с глубиной быстро уменьшается от 0,70 в слое 0–10 и 0,46 в слое 10–20 см до 0,24 (связь незначима) в слое 20–30 см. Аналогичным образом ведет себя связь содержания углерода с МГ (табл. 57). В отличие от Спирменовских коэффициентов корреляции обычные коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием углерода и величиной УП для всех трех слоев оказываются статистически значимыми (с глубиной они меняются от 0,60 до 0,23). При этом для нижнего слоя величины Пирсоновского и Спирменовского коэффициентов совпадают, а в верхнем слое коэффициент корреляции Спирмена оказывается больше, чем Пирсона. По-видимому, причиной такого расхождения является криволинейность связи между содержанием углерода и УП в слое 0–10 см. Действительно, в результате линеаризации связи путем замены исходных значений УП и содержания С их логарифмами коэффициент корреляции Пирсона увеличивается до 0,67 и практически оказывается равным коэффициенту корреляции Спирмена.

В пределах отдельных слоев в большинстве случаев обнаруживается отчетливо выраженная обратная связь между величинами рН и другими свойствами.

Особый интерес в связи с рассматриваемой проблемой может представлять связь изученных свойств с рельефом участка. Оказалось, что с повышением отметок рельефа в слое 0–10 см отмечается возрастание величин С, УП и МГ и снижение величины рН. Для последнего свойства корреляция с рельефом проявляется на всех трех глубинах и наиболее выражена, а для С связь менее выражена и только для двух верхних глубин. Очевидно, что связь почвенных свойств с рельефом может быть либо обусловленной влиянием самого рельефа, либо некоторым внешним по отношению к рассмотренным явлениям фактором (например, древостоем), определившим в определенной мере согласованное изменение как рельефа участка земной поверхности, так и свойств почв.

Таким образом, из анализа общей картины изменчивости четырех изученных свойств следует, что если организующая роль деревьев и центров окон в кронах деревьев и имеется, то она, по-видимому, в основном проявляется в свойствах верхней 10 см толщи почв и едва ли в свойствах слоя на глубине 20–30 см.

←  
Рис. 27. Карты распределения на изучаемом участке рН (2а), содержания углерода (3б) и максимальной гигроскопичности (2в) в слое 0–10 см и удельной поверхности в слоях 0–10 см (2г) и 10–20 см (2д)

Условные обозначения те же, что на рис. 26

Таблица 57

Коэффициенты корреляции Пирсона  $r$  (в верхней правой половине)  
и Спирмена  $r_s$  (в нижней половине)  
(полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции с  $\alpha = 0,05$ )

Свойство	Слой, см	С в слоях, см			УП в слоях, см			МГ в слоях, см			рН в слоях, см		
		0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30
Н		<b>0,29</b>	<b>0,25</b>	0,02	<b>0,45</b>	<b>-0,16</b>	0,03	<b>0,42</b>	0,00	0,07	<b>-0,60</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,30</b>
	0-10		<b>0,40</b>	0,04	<b>0,60</b>	0,04	-0,05	<b>0,70</b>	<b>0,23</b>	-0,07	<b>-0,57</b>	<b>-0,46</b>	-0,08
	10-20	<b>0,42</b>		<b>0,28</b>	<b>0,26</b>	<b>0,51</b>	0,03	<b>0,33</b>	<b>0,64</b>	-0,05	<b>-0,19</b>	<b>-0,55</b>	0,07
С	20-30		<b>0,38</b>		0,06	<b>0,29</b>	<b>0,23</b>	0,09	<b>0,31</b>	<b>0,16</b>	0,03	<b>-0,25</b>	0,01
	0-10	<b>0,70</b>				-0,07	0,06	<b>0,90</b>	0,15	0,07	<b>-0,67</b>	<b>-0,53</b>	<b>-0,20</b>
	10-20		<b>0,46</b>		-0,09		-0,03	0,00	<b>0,74</b>	-0,09	0,18	-0,10	0,24
УП	20-30			<b>0,24</b>		-0,04		0,00	0,10	<b>0,86</b>	0,02	-0,10	-0,59
	0-10	<b>0,78</b>			<b>0,92</b>				<b>0,18</b>	-0,02	<b>-0,71</b>	<b>-0,55</b>	-0,13
	10-20		<b>0,61</b>			<b>0,78</b>		0,12		0,01	-0,02	<b>-0,39</b>	0,11
МГ	20-30			<b>0,20</b>			<b>0,87</b>		0,02		0,04	-0,10	<b>-0,74</b>
	0-10	<b>-0,61</b>	<b>-0,21</b>	0,02								0,64	<b>0,22</b>
	10-20	<b>-0,44</b>	<b>-0,55</b>	<b>-0,29</b>							<b>0,65</b>		<b>0,29</b>
рН <sub>KCl</sub>	20-30	-0,11	0,04	0,06							<b>0,30</b>	<b>0,37</b>	

## ОРГАНИЗУЮЩАЯ РОЛЬ ДРЕВОСТОЯ

Среди 166 точек опробования 42 точки оказались вне проекции крон, т.е. в “окне” (ОК), и 124 точки под кронами деревьев, из которых 22 точки находились на удалении не более 1 м от стволов деревьев, т.е. в зоне, условно названной приствольной (ПР), а остальные 102 точки считались находящимися в собственно подкрановом пространстве (ПП).

В пределах изученной площади различия между относительными высотами (Н) отдельных точек поверхности укладываются в 21 см. По мере приближения от окна к стволам деревьев (ОК, ПП, ПР) закономерно увеличиваются средние относительные отметки рельефа: 5,3, 7,9, 11,3 см (см. табл. 56). Дисперсия имеет наименьшее значение в окне, под кронами и в приствольной части они примерно в два раза больше и практически равны между собой.

Допущение, что по каким-то причинам деревья (дожившие до зрелости) выросли изначально на более повышенных элементах микро-нано-рельефа, в принципе не столь уж маловероятно – почему бы этим местообитаниям не оказаться более экологически благоприятным для выживания подростов древесных пород. Но более правдоподобно выглядит предположение, что по мере роста корней деревьев поверхность почвы приподнимается. Поскольку вблизи комля дерева корни наиболее крупные и их размещение в теле почвы отчетливо локализовано, приподнимание уровня поверхности почвы в этой части почвенного покрова должно быть также значительно более локализованным, чем в более удаленных от ствола дерева участках. В связи с этим наряду с повышением относительных отметок рельефа в направлении окна – ствол дерева, в том же направлении следует ожидать роста дисперсии в отметках рельефа, что действительно и имеет место.

Если микрорельеф считать в определенной мере результатом произрастания современного древостоя, то обнаруживаемая между отметками рельефа местности и свойствами почв связь прямо или опосредованно также может быть следствием организующей роли древостоя.

Среди изученных четырех свойств почв (С, УП, МГ и рН) в наибольшей мере зависимость от размещения деревьев и их крон обнаруживают содержание углерода и рН (см. табл. 56).

Прежде всего на всех трех глубинах выявлена неоднородность дисперсий С в разных зонах (по критерию Бартлетта с уровнем значимости менее 0,001 для верхних двух слоев и с уровнем значимости 0,05 для слоя 20–30 см). В верхнем слое наибольшая дисперсия оказалась в почвах приствольной зоны, наименьшая – в окнах. В слое 10–20 см максимальная дисперсия также приурочена к приствольной зоне, в остальных зонах дисперсии примерно в 1,5 раза меньше и практически одинаковы. В нижнем слое дисперсии невелики и если и различаются, то не так, как в верхних слоях: наибольшей дисперсией характеризуется содержание углерода в окне, а наименьшей – в приствольной части.

В определенной мере аналогичным образом ведут себя и средние значения содержания С: в верхних двух слоях наибольшие средние отмечаются в приствольной части площади и уменьшаются в ПП и далее в ОК. При этом в последовательности зон ПР-ПП-ОК средние при переходе от одной зоны к другой уменьшаются в слое 0–10 см примерно на 1%, а в слое 10–20 см – на 0,2–0,15%. В слое 20–30 см различия между средними незначимы и ничтожно малы (не превышают 0,004%). Все эти результаты в общем аналогичны полученным ранее.

Дисперсии рН по зонам отличаются только в верхнем слое, где наибольшие значения отмечаются в ПР и ПП. Но средние значения рН в отличие от С, как

и следовало ожидать в этом слое возрастают от ПР и ОК. В нижележащих слоях средние по зонам отличаются очень мало, хотя тенденция того же рода сохраняется и здесь.

Организирующая роль древостоя обнаруживается и в пространственной организации УП и МГ, хотя и не столь сильно, как для содержания углерода или рН. Так в разных зонах (ПР-ПП-ОК) дисперсии обнаруживают статистически значимые различия не на всех глубинах: для УП значимо различаются дисперсии в слоях 0–10 и 20–30 см, а для МГ – только в верхнем слое. В отличие от углерода, наименьшие дисперсии УП и МГ отмечаются в слое 10–20 см, а наибольшей вариабельностью характеризуется верхний слой (за исключением МГ в окне, где максимум дисперсии приходится на слой 20–30 см).

Менее отчетливо выражена зависимость от размещения деревьев и их крон для средних значений УП и МГ. Эта зависимость статистически надежно выявляется только в слое 0–10 см и проявляется в закономерном возрастании средних от ПР к ОК при разнице между средними в соседних зонах около  $6\text{--}9 \text{ м}^2/\text{г}$  для УП и 0,7% для МГ.

Отмеченные выше особенности в изменении средних и дисперсий свойств по отдельным слоям в зависимости от принадлежности к той или иной зоне определяют усредненную для каждой зоны профильную дифференцированность почв в пределах верхней 30 см толщи.

Если в качестве меры дифференцированности использовать величину отношения максимальных значений к минимальным, то, как и следовало ожидать, наибольшие различия в степени дифференцированности профиля почв разных зон оказываются связанными с содержанием органического углерода: в направлении ПР-ПП-ОК отношения дисперсий в этом ряду снижаются как 149–63–9, а отношения средних от 11,9 к 9,1 и далее до 6,5.

Для УП и МГ дифференцированность по дисперсиям оказалась слабо выраженной с колебаниями от 2,0 до 2,8 (с максимумом в ПП) для УП и от 3,3 до 4,2 (с одинаковым максимумом в ПР и ПП) для МГ.

Дифференцированность верхней 30-см толщи по средним значениям для УП и МГ оказалась совершенно одинаковой: в последовательности ПР-ПП-ОК отношения средних дали ряд 1,9–1,5–1,3, то есть как и для углерода показали снижение дифференцированности почв по мере удаления от стволов деревьев. Аналогичная тенденция в изменчивости средних прослеживается и для рН, хотя сами отношения очень близки к единице и меняются от ПР к ОК очень мало (от 1,12 до 1,04).

Итак, не вызывает никаких сомнений тот факт, что в направлении от приствольного пространства к окну средние и дисперсии С, УП и МГ закономерно уменьшаются, а рН возрастают по крайней мере в верхнем 10 см слое. В том же направлении закономерно снижается дифференцированность верхней 30 см толщи по всем изученным свойствам.

В связи с этим вполне естественно допустить, что из всего множества значений таких свойств, как С, УП и МГ, в пределах ПР должны предпочтительно встречаться наибольшие значения, а к ОК принадлежать самые низкие. Для рН в ПР должны предпочтительно встречаться самые низкие значения, а в ОК – самые высокие. При справедливости такого допущения в 22 точках, приходящихся на ПР, в лучшем случае могли бы быть обнаружены 22 самых высоких значения С, УП, МГ и столько же самых малых значения рН. Если в качестве меры приуроченности использовать тетракорический показатель связи (коэффициент корреляции Браве  $r_B$ ), то при этом было бы получено  $r_B = 1$ . Но было бы

Тетракорические показатели связи (коэффициенты корреляции Бравэ  $r_B$ ), отражающие приуроченность минимальных (максимальных) значений свойств к приствольной зоне или окну

Свой-ство	Положение точки на участке	Минимальные значения на глублине			Максимальные значения на глублине		
		0–10 см	10–20 см	20–30 см	0–10 см	10–20 см	20–30 см
С	Приствольная зона	-0,10	-0,15*	-0,05	0,21**	0,16*	0,00
	Окно	0,33**	0,14	-0,02	-0,27**	-0,12	-0,05
УП	Приствольная зона	-0,15*	-0,05	0,00	0,06	0,06	-0,15*
	Окно	0,30**	-0,02	-0,05	-0,27**	0,08	0,11
МГ	Приствольная зона	-0,15*	-0,05	0,00	0,21**	0,17*	-0,05
	Окно	0,24**	0,08	-0,05	-0,27**	-0,08	0,08
рН <sub>КС</sub>	Приствольная зона	0,32**	0,21**	-0,02	-0,15*	-0,08	-0,15*
	Окно	-0,34**	-0,19**	-0,02	0,33**	0,18**	0,10

\* Связь значима с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ ; \*\* связь значима с уровнем значимости  $\alpha = 0,01$  (обозначения см. в примечании к табл. 56).

слишком опрометчивым думать, что в ПР представлены только максимально высокие значения С, УП и МГ (или самые низкие значения рН), хотя бы по тем соображениям, что среди остальных 144 значений может быть немало близких по значениям к 22 самым большим (для рН – малым), которые могут оказаться в пределах ПР. Поэтому более оправданно ожидать получения  $r_B$  по величине несколько меньшего единицы.

С другой стороны, поскольку в ПР значения С, УП и МГ в среднем оказываются наибольшими, то кажется совсем невероятным, чтобы какие-либо из 22 самых малых значений из 166 результатов измерений обнаружались в ПР. По аналогичным соображениям трудно допустить, что возле стволов деревьев обнаружится какое-либо значение рН из 22 наиболее высоких. То есть не вызовет никакого удивления то, что приуроченность минимальных значений С, УП и МГ или максимальных значений рН к ПР окажется оцениваемой  $r_B = -1$ .

Аналогичные рассуждения в отношении встречаемости тех или иных значений свойств в ОК позволяют предположить, что есть основания ожидать получения высоких положительных значений  $r_B$  для приуроченности минимальных значений свойств (для рН – максимальных значений) к ОК, и еще больших по абсолютной величине, но отрицательных значений  $r_B$ , оценивающих приуроченность максимальных значений (для рН – минимальных значений) к ОК.

Анализ подобного рода взаимосвязей показал (табл. 58), что все обстоит далеко не так, как это предполагалось.

Для С, УП и МГ, имеющих однотипную изменчивость по мере удаления от стволов деревьев к окнам, приуроченность максимальных значений к ПР оказалась статистически значимой только для С и МГ для слоев 0–10 и 10–20 см, причем величина  $r_B$  не превышала значения 0,21. Для УП  $r_B$  в верхних двух слоях оказался очень малым и статистически не значимым, а в слое 20–30 см не толь-



ко отрицательным, но значимым статистически. Вопреки ожиданиям, минимальные значения для ПР оказались не столь уж маловероятными. Лишь в слое 0–10 см УП и МГ и в слое 10–20 см С обнаружили статистически значимую отрицательную связь для приуроченности минимальных значений к ПР при очень малом  $r_B = -0,15$ .

Несколько большая степень связи у тех же свойств обнаруживается для приуроченности минимальных значений к ОК (до  $r_B = 0,33$ ), хотя только в слое 0–10 см. Но и здесь приуроченность максимальных значений к ОК оценивается небольшими по абсолютной величине и одинаковыми для всех свойств коэффициентами  $r_B = -0,27$ .

В целом такого же характера связи обнаружены и при оценке приуроченности минимальных и максимальных значений рН для зоны ПР и ОК. Статистически значимо к ПР приурочены минимальные значения рН в двух верхних слоях, но присутствие здесь и самых высоких значений не является исключением, поскольку  $r_B$ , оценивающие их приуроченность к этой зоне, не превышают по абсолютной величине 0,15. Для ОК значимые связи обнаруживаются более надежно, но тоже только для двух верхних слоев. При этом как положительные, так и отрицательные связи практически проявляются одинаково: для слоя 0–10 см  $r_B$  по абсолютной величине не превышают 0,34, а для слоя 10–20 см – 0,19.

Малость величин тетракорических коэффициентов связи даже для слоя 0–10 см означает, что в пространственной вариации значений изученных свойств организующая роль древостоя и окон в древесном пологе хотя и проявляется, но с ее влиянием связано не более 10% общей варибельности, оставшиеся же 90% могут быть рассматриваемы в качестве случайной составляющей, не зависящей в рамках рассматриваемой модели ПР-ПП-ОК от учитываемой структуры древостоя.

В организованности свойств существует определенная закономерность в чем можно убедиться. Но даже в слое 0–10 см мы обнаружим, что эти закономерности оказываются более сложного характера, чем это следует из модели тессеры. По крайней мере той концентричности в пространственной организации свойств вокруг эдификаторов мы не обнаруживаем даже для такого свойства как  $pH_{КС}$ . Так, если между елями  $E_4$  и  $E_5$  величина рН не превышает нижнего квартиля, то между елями  $E_4$  и  $E_3$  она меняется почти по классическому образцу, имея минимальные значения возле стволов деревьев и постепенно увеличиваясь к середине расстояния между ними. От ели  $E_3$  к  $E_2$  рН устойчиво возрастает, причем в ближайшей окрестности ели  $E_2$  величина рН может быть практически любой из возможных на изученной площади. При том, что в окне значения рН оказываются отчетливо более высокими, они и здесь могут опускаться до значений нижнего квартиля. Во многом сходную картину мы наблюдаем и в пространственном поведении значений С, МГ и УП в слое 0–10 см.

Заслуживает внимания рассмотрение полей свойств возле деревьев  $E_3$  и  $E_2$ , которые, будучи одинаково крупного размера и солидного возраста, имеют вокруг себя совершенно разную организацию свойств: если  $E_3$  вокруг себя создала, хотя и с некоторыми оговорками, тессероподобную структуру в организации свойств, то вокруг  $E_2$  ничего даже отдаленно напоминающего тессеру не наблюдается. Особо нужно заметить, что такие свойства, как рН, С и УП (или МГ) определялись независимыми друг от друга методами, но выявили практически однотипные закономерности в организации свойств, что позволяет серьезно относиться к подобному рода явлениям.

При всей отмеченной выше неоднозначности поведения свойств вокруг стволов деревьев, нельзя не заметить и того, что почти по любому радиальному направлению от стволов елей мы обнаружим отчетливо выраженную тенденцию роста (для рН) или уменьшения (для С, МГ, УП) значений свойств. Но поскольку все эти изменения значений начинаются с разных уровней и идут с неодинаковой быстротой, то поля свойств не образуют той концентричности, которая должна была бы быть в организации почвенного пространства при наличии тессер.

В более глубоких слоях организованность свойств, как следствие воздействия эдификаторов, даже по визуальным оценкам практически не проявляется. Очевидно, что даже с большой натяжкой выявить влияние деревьев и окон на поведение этого свойства здесь не удастся.

Возможные причины всех подобных отклонений были упомянуты нами в начале статьи, а результаты отклонений обнаружались в приведенном выше анализе средних значений и коэффициентов связи.

Таким образом оказывается, что если и можно что-либо утверждать относительно организующей роли древостоя и окон в древесном пологе, то это утверждение может касаться лишь того, что такие свойства почвы как С, УП, МГ и рН в изученных нами зонах ПР, ПП и ОК различаются только *в среднем*.

### Обсуждение

Если принять во внимание, что коэффициенты связи Бравэ чаще оказываются более высокими для ОК, чем для ПР, создается впечатление, что окна оказывают более “целенаправленное” воздействие на свойства почв, влияние же деревьев проявляется менее отчетливо. Однако подобное заключение, видимо, не слишком верно, особенно, если обратить внимание на неоднородность свойств в пределах отдельных зон.

Прежде всего нельзя не обратить внимания на дифференциацию почвенных профилей в пределах верхних 30 см, которая по большинству свойств наиболее выражена под деревьями, что может служить указанием на активную роль в процессах преобразования полей свойств именно деревьев, а не окон.

Признавая факт безусловно слабого, хотя и статистически значимого влияния древостоя на почвы, следует заметить, что здесь мера воздействия эдификаторов оценивается по приуроченности тех или иных классов значений свойств к отдельным зонам. Но ведь интенсивность влияния может проявляться не только в сдвиге средних значений, но и в расширении пределов колебаний значений свойств в отдельных зонах. Отмеченное ранее нередко весьма существенное возрастание дисперсии свойств в ПР и ПП по сравнению с ОК в верхних 10–20 см почвенной толщи, по-видимому, является убедительным подтверждением наличия такого рода воздействия деревьев на почвы.

Но, если деревья оказывают мощное воздействие на свойства почвы не путем однонаправленного изменения значений свойств в той или иной зоне, и тем самым и на изменение средних, а путем увеличения разнообразия значений свойств вблизи деревьев, то не должно быть и серьезных оснований надеяться на получение высоких степеней связи, измеряемой коэффициентами Бравэ.

Среди изученных свойств, видимо, наиболее консервативными можно считать УП и МГ, и то, что они обнаруживают, хотя бы и в среднем, некоторую зависимость от существующего в настоящее время размещения деревьев, можно рассматривать как свидетельство достаточно быстрого изменения этих свойств.

Однако известно, что УП почвы в значительной мере зависит от содержания в ней органических веществ. И приведенные выше данные (см. табл. 57) это подтверждают. В связи с этим неизбежно возникает вопрос, а не определяется ли изменчивость УП при переходе от ПР к ОК тем, что за время жизни одного поколения деревьев в почвенном покрове происходит лишь изменение содержания С, а изменение таких свойств как УП и МГ оказывается всего лишь следствием их зависимости от содержания С.

Высказанные предположения легко проверяются, если принять во внимание, что зависимость УП от С для слоя 0–10 см неплохо аппроксимируется уравнением регрессии  $y = 40,6 + 5,85x$ , где  $y$  есть усредненная величина УП для заданного значения содержания  $C = x$ . Если УП изменяется под воздействием эдификаторов не только вследствие изменения содержания С, то разность между измеренной величиной УП в каждой из точек опробования и вычисленной по уравнению регрессии должна обнаруживать значимую зависимость от принадлежности точки опробования к зонам ПР-ПП-ОК. Проведенный анализ показывает, что такого рода зависимость для ряда разностей отсутствует. Пропадает она и для МГ в слое 0–10 см.

### Заключение

Подводя итоги всему выше изложенному, можно прийти к выводу, что в лесном биогеоценозе за время жизни (150–200 лет) одного поколения елей в дерново-подзолистых почвах может формироваться пространственная структура организации некоторых свойств почв, прямо связанная с влиянием деревьев и окон в их кронах. Организующая роль древостоя проявляется в закономерной изменчивости как средних показателей и дисперсии свойств, так и дифференцированности профиля почв по отдельным свойствам в пределах верхних 30 см профиля. В направлении от стволов деревьев к окнам в среднем уменьшается содержание углерода органических соединений, удельная поверхность и максимальная гигроскопичность, как и относительные высоты рельефа. Величины  $pH_{KCl}$  в том же направлении в среднем возрастают. Дисперсии большинства свойств под кронами елей и особенно вблизи стволов деревьев выше, чем в окнах.

Организующая роль древостоя наиболее заметно проявляется в изменчивости вдоль поверхности средних значений  $pH_{KCl}$  и содержания углерода в слоях 0–10 и 10–20 см. В слое 20–30 см такого влияния не установлено. Пространственная организация удельной поверхности и максимальной гигроскопичности почв также связана с влиянием древостоя, но, во-первых, это влияние надежно выявляется только в пределах верхнего 10 см слоя, а во-вторых, изменчивость удельной поверхности и максимальной гигроскопичности оказывается связанной с неоднородностью содержания в почвах органического углерода. Таким образом, направленная изменчивость средних значений удельной поверхности и максимальной гигроскопичности есть всего лишь следствие изменений в режиме гумусонакопления под пологом лесной растительности, но не результат каких-либо изменений минеральной части почвенной массы.

Хотя в среднем изученные свойства и проявляют закономерную изменчивость по мере движения от стволов деревьев к окнам, эта закономерность имеет всего лишь характер тенденции, так как приуроченность каких-либо классов значений свойств к окнам или отдельным частям подкранового пространства оказывается крайне слабо выраженной. Следствием этого является то, что

сколь либо отчетливо выраженной концентрической структуры в организации изученных свойств не обнаруживается даже в слое 0–10 см.

Из всего вышесказанного следует, что за 150–200 лет жизни деревьев ели одного поколения в почвенном покрове возникают изменения в пространственной организации лишь достаточно лабильных свойств (рН, содержание углерода органических соединений) и на глубинах, не превышающих 20 см, а значит структуры свойств, возникающие под влиянием такого рода эдификаторов, достаточно лабильны и могут представлять интерес не столько с точки зрения информационной памяти почв, сколько для понимания особенностей функционирования лесных биогеоценозов, механизмов нарушения квазиравновесных состояний в почвенном покрове и скоростей их преодоления.

---

---

## ЧАСТЬ III

---

---

# ГЛОБАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

### ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров или педосфера, как глобальная природная оболочка суши оказывает воздействие на другие природные геосферы, такие, как атмосфера, гидросфера, литосфера. Это влияние сказывается как в прямом изменении химического состава, так и в их эволюции. По крайней мере с мелового периода процессы геологической эрозии в большей мере переносят почвенные материалы, включенные в почвообразование, чем собственно материал горных пород. Поэтому осадочные породы этого и более поздних периодов следует рассматривать, во всяком случае, значительную их часть, как материал, прошедший цикл почвообразования. Это – нормальная геологическая, очень медленная эрозия, приводящая к денудации и выравниванию поверхности Земли.

Литосфера, перекрытая почвой, не остается неизменной и подвергается процессам разрушения, выветривания, преобразования, включая процесс, который можно назвать педолизом: разрушение горной породы под воздействием почвенных процессов (аналогично, гидролизу – разрушению под действием воды).

В отношении гидросферы Земли почвенный покров выступает в качестве фильтра – преобразователя состава атмосферных осадков, формируя химический состав почвенно-грунтовых вод и речного стока в мировой океан. Тем самым почвенный покров суши влияет на химический состав океана, а значит и на его биоту.

Выделение почвой диоксида углерода, метана и других газов (“дыхание почвы”) оказывает существенное влияние на состав атмосферного воздуха, особенно приземных его слоев. Газовые функции почв привлекают все большее внимание ученых в связи с “парниковым” эффектом угрожающим общим потеплением климата Земли.

Настоящая глава монографии раскрывает глобальные функции почвенного покрова.

## Глава I

### ВЛИЯНИЕ ПОЧВ И ПОЧВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЛИТОСФЕРУ

С глобальных позиций эволюции Земли как планеты и эволюции ее поверхностных оболочек – педогенез также глобальный субаэральный процесс. Почвенный покров суши (педосферы) – специфическая оболочка и новая природная система, которую можно рассматривать как новый эволюционный этап в истории Земли, связанный с выходом биоты на поверхность суши в силуре и последующим освоением верхних слоев литосферы в глобальном масштабе.

Педогенез неразрывно связан с процессами выветривания, однако сводится не только к ним. Геохронологически педогенез как экзогенный и биокосный процесс существенно моложе выветривания. Как известно, абиотическое выветривание (и механическое, и химическое) началось на поверхности суши на самых ранних этапах геологической истории Земли, когда агрессивная газонасыщенная и, видимо, кислая атмосфера взаимодействовала с преимущественно изверженными породами верхней литосферы. Продукты такого взаимодействия в виде абиотических кор выветривания раннего архея и даже более ранних этапов догеологической истории Земли и коррелятных осадков зафиксированы в геологической литературе.

С появлением биоты на суше и формированием биосферы суши в поверхностных слоях литосферы возникают и эволюционируют принципиально новые биокосные процессы и системы: почвообразование=педогенез, почвы, почвенный покров суши – педосфера.

Почва – одна из самых сложных природных биокосных систем Земли и как всякая биокосная система является многокомпонентной (атмо-, гидро-, био-, лито) системой, функционирующей путем взаимодействия всех компонентов между собой. Однако в отличие от других биокосных систем (водных, воздушных) почвенная система по определению располагается в субаэральных верхних слоях литосферы, в твердофазной литосферной матрице, которая является одновременно и вмещающим веществом (каркасом) системы, и одним из взаимодействующих компонентов системы, и основным трансформируемым веществом системы. Твердый и относительно неподвижный каркас почвенной системы приводит к тому, что твердофазные продукты почвообразования и выветривания, в отличие от газообразных и жидких, в основном, не способны покинуть эту систему (уйти из нее вверх, вниз или вбок) и накапливаются внутри системы *in situ* постепенно меняя состав и организацию исходного неподвижного каркаса – материнской породы, то есть постепенно превращая литоматрицу системы в педоматрицу.

С такой точки зрения почвенная система является одновременно и самостоятельной системой (природным телом по В.В. Докучаеву), и частью – подсистемой в биосфере и в эко(гео) системе и частью – подсистемой – в литосфере и в ее гипергенных (экзогенных) системах, т.е. почва как система принадлежит одновременно как подсистема многим другим более крупным системам. В этом смысле, по отношению к литосфере, почва, как и осадочная оболочка, является одной из экзогенных – гипергенных систем литосферы, а именно, самой верхней оболочкой литосферы суши, измененной *in situ* совместным воздействием солнечно-космических потоков вещества и энергии, атмосферы, гидросферы, биоты и локальным (палеолит и неолит) и глобальным (XX в.) воздействием человеческой деятельности.

В данной главе рассматриваются как процессы образования и функционирования почвенной системы и как уже сформировавшиеся почвенные тела и покровы влияют, воздействуют на литосферу, изменяют ее.

### Докучаевская модель почвообразования

Центральная, или докучаевская, модель педогенеза (для “нормальных”, по Докучаеву, почв), уточненная А.А. Роде, едина. Происходит проникновение в относительно неподвижные верхние слои литосферы (рыхлые или плотные) потоков и циклов вещества (солнечно-космических, атмосферных газов, твердых и жидких осадков, биотических, биогеохимических, биотурбационных), взаимодействие их с веществом литосферы и превращение этих слоев в почву.

Под влиянием гравитационных и иных сил разные по интенсивности, качеству и количеству подобные потоки проникают в твердофазную толщу литосферы на разную глубину и тем самым как бы разделяются, сортируются по глубине на разные комбинации. В результате, уже на самых первых стадиях такого многофазного контакта, в толще материнских пород литосферы сверху вниз, от дневной поверхности, возникают вертикально стратифицированные неоднородные комбинации температуры, влажности, состава растворов и газов, макро, мезо и микробиоты. Это, в свою очередь, создает разные условия для различных реакций взаимодействия между всеми компонентами такой многофазной системы между собой и с твердофазным веществом литосферы. Так возникают и начинают работать отдельные функциональные горизонты и функциональный профиль почвенной системы, стратифицированный сверху вниз по глубине.

Эти быстро возникающие горизонты и профили функционирования, сменяясь во времени, создают суточные, месячные, годовые и более длительные режимы функционирования (жизни) толщи почв и кор выветривания. Именно устойчивая пространственная (вертикальная и латеральная) неоднородность горизонтов, профилей и режимов функционирования служит фундаментальной причиной различия процессов выветривания и почвообразования, как процессов изменения твердой фазы литосферы, превращения ее в разные горизонты и толщи различных почв и кор выветривания.

Изменение твердого вещества литосферы в Зоне почвообразования и выветривания может охватывать разную толщу породы в зависимости от биоклиматических условий, глубины и интенсивности функционирования почвенной системы. Главнейшими параметрами, контролирующими степень, глубину и интенсивность (в том числе скорость) преобразования вещества литосферы являются количество и качество почвенных растворов, тепловой режим почвы, количество, активность и “агрессивность” фито-, микро- и зообиоты, щелочно-кислотная и окислительно-восстановительная обстановка и ряд других. Общим, хотя и несколько огрубленным правилом является: чем теплее и длительнее период почвообразования, чем большее количество влаги проникает в почву и чем больше глубина ее фильтрации, чем больше ежегодная фито-, микро- и зообиомасса и чем больше из нее образуется агрессивных органических веществ, – тем интенсивнее и глубже происходят процессы педогенеза и выветривания, за один и тот же период времени.

По отношению к литосфере педогенез и выветривание могут рассматриваться как особые типы экзогенных процессов, а именно как инситные экзогенные процессы, в отличие от денудационно-аккумулятивных процессов, переме-

щающих твердое вещество в латеральных направлениях. Инситуные экзогенные процессы преобразуют вещество литосферы на месте, накапливая в ее верхних слоях новообразованные и преобразованные твердофазные соединения и структуры *in situ*. Именно, вследствие этого, в почвах и корах выветривания возникает анизотропия с вертикальной профилно-горизонтной ориентацией, обособляющей верхние слои литосферы в особые системы.

Изменение литосферы под влиянием педогенеза можно представить как взаимодействие двух “потенциалов”: экзогенного почво- и корообразующего потенциала климата и биоты, который включает в себя агрессивные по отношению к материнской породе факторы (тепло, влага, живая биота, продукты ее жизнедеятельности и разложения и т.п.), и акцепторный или трансформационный потенциал литосферной материнской породы (литоматрицы), который заключается в способности породы изменять свой состав и организацию под влиянием экзогенного потенциала, т.е. степень устойчивости – изменчивости породы в процессах выветривания и почвообразования.

### Глобальные литосферные функции почв и почвообразовательных процессов

Наряду со многими другими глобальными функциями почв (биосферными, гидро- и атмосферными и др.) можно выделить ряд литосферных функций, которые осуществляются в глобальном масштабе на всем пространстве педосферы, но существенно различаются качественно и количественно.

*Вещественные или субстратные функции:* в почве (почвенной зоне литосферы) под действием педогенеза и выветривания возникают новые вещества и соединения, отсутствовавшие в материнской породе. Это, во-первых, почвенное органическое вещество – гумус, подстилки и войлоки, различные модификации торфянистых веществ. Это обширный класс органико-минеральных соединений физической, физико-химической и химической природы – хелаты, гумусово-вообразованные и трансформированные минералы и новые гранулометрические легкорастворимые соли, гипс, карбонаты, многие дисперсные фракции мелкозема – прежде всего фракции ила и тонкой пыли, а в почвах на плотных породах весь мелкозем является педогенным.

*Организационные или структурные функции:* под действием процессов протекающих в почве, вследствие появления в ней новых веществ, деятельности макро-, мезо-, и микробиоты, потоков растворов, колебаний влажности и температуры возникает принципиально другая пространственная организация твердой фазы и пустот (пористости) в почвенном теле по сравнению с породой. В широком смысле слова это можно назвать структурой почвенной системы, которая имеет многоуровневую иерархическую организацию, начиная от зерен скелета и частичек глинистой плазмы, через уровни внутрипедной структуры, затем уровни внутригоризонтных ансамблей педов, уровни морфонов и горизонтов, и далее уровней почвенного тела (педона) и почвенного покрова. Принципиально важно, что почвы имеют обычно специфическую, не встречающуюся в изверженных и осадочных породах структуру и, что особенно важно, в большинстве случаев существенно более высокую пористость, даже во многих слитых горизонтах и цементированных пэнах. Благодаря высокой и разнообразной пористости почвы обычно намного более газо- и водопроницаемы, чем горные породы и, что наиболее важно, представляют наиболее благоприятную и экологически разнообразную среду для корней высших растений и многообразной мезо- и микробиоты.



*Энергетические функции почв.* Почва является основной зоной, в которой горные породы верхних слоев литосферы, термодинамически неравновесные с условиями атмосферы и биосферы постепенно приходят в процессе педогенеза в состояние динамического равновесия открытой системы. При этом почвы обогащаются свободной энергией, благодаря накоплению энергетически богатого органического вещества и накоплению тонкодисперсных минеральных и органо-минеральных соединений (и особенности глинистых силикатов) с огромной удельной поверхностью и, вследствие этого, с большим запасом поверхностной энергии тонкодисперсных фаз. Как энергетически активная система почва воздействует на литосферу (педолиз), ускоряя ее преобразование.

*Информационные функции почв.* Новые и трансформированные вещества и структуры возникают в почве как результат длительного функционирования почвенных систем и процессов педогенеза и выветривания. Состав, свойства, внутренняя структура, пространственное взаиморасположение отражают особенности сформировавших их процессов, внутрипочвенную обстановку их образования. В свою очередь, эта обстановка зависит от процессов обмена почвенной системы с внешней средой, с другими природными системами, или, как принято говорить в почвоведении, с факторами почвообразования. Таким образом, внутренние процессы почвообразования “записываются” в составе, свойствах и структуре твердой почвенной массы. Такого рода информацию о процессах и внешней среде почвообразования за определенный период времени называют памятью почвы, подразделяя на память разных компонентов (гумуса, минералов, биолитов и т.д.) разных по иерархии структур (леды разных форм и порядков), поверхностей раздела и внутренних частей почвенных масс и горизонтов и т.д. Отсюда в верхних слоях литосферы возникает принципиально новый тип записи информации в виде инситной и палимпсестовой памяти о взаимодействии *in situ* атмосферы, гидросферы и биоты с литосферой, коренным образом отличный от латеральной транспортированной, книгоподобной памяти осадочных пород и эндогенной памяти изверженных и метаморфических пород литосферы.

### **Трансформационно-защитные функции почв по отношению к литосфере**

Формирование почвенно-растительного естественного покрова на поверхности литосферы суши выполняет двоякую функцию: оно трансформирует (разрушает и изменяет) исходный состав и структуру почвообразующих пород, т.е. верхних слоев литосферы, и, одновременно образует рыхлый, “мягкий”, газо-, водо-, корнепроницаемый плащ, покров, оболочку на литосфере. Такой покров, особенно вместе с естественным растительным покровом разной степени сомкнутости, играет роль мощного буфера между агрессивными потоками и гидросферы и нижележащими слоями, толщами литосферы. Защита от прямого действия сильных ветров рыхлых и раздуваемых горных пород, от ветровой коррозии плотных пород, перевод значительной части атмосферных осадков в замедленный внутрипочвенный сток и глубокую инфильтрацию, резкое сокращение поверхностного плоскостного и руслового стока, наиболее эрозионно опасного – вот основные механизмы защитного действия почв и биоты по отношению к литосфере. Наиболее ярко они проявляются в тектонически стабильных территориях, где формируются наиболее зрелые, мощные почвенные покровы и стабильные развитые биоценозы. Важную роль защитный почвенно-

растительный покров играет в горных и сильно расчлененных высоких равнинах, где интенсивность денудации возрастает, почвенный покров относительно молод и не столь мощен и где даже маломощные почвы и скрепленные корнями дерновинные горизонты очень эффективны в ослаблении процессов эрозии мелкозема.

**Вертикальная анизотропия почвы  
по функционированию, составу и структуре:  
общая идеальная и специфические дополнительные модели**

Для всех случаев почвообразования на суше характерно наличие поверхностного или верхнего фронта воздействия атмо- и гидросферных и биотических потоков и циклов вещества и энергии (факторов почвообразования) на дневную поверхность литосферы. Широко известны множество случаев более сложных комбинаций потоков (латеральные и грунтово-водные гидрогенные, денудационно-аккумулятивные твердофазные, поверхностные, внутри- и подпочвенные). Все они являются в той или иной степени факультативными. При почвообразовании наличие факторов, взаимодействующих с поверхностью почвы является абсолютно обязательным, облигатным, без них функционирование и формирование природных почвенных систем невозможно.

На поверхности раздела атмосфера – литосфера, т.е. на верхней границе почвы действуют “факторы” очень разного характера, интенсивности, степени проникновения вглубь литосферы. Солнечная радиация, тепловые потоки разной частоты и длительности, жидкие растворы и твердые частицы, поступающие из атмосферы с разной периодичностью и в разном количестве, наконец, биота заселяющая поверхность почвы, – все эти “факторы” образуют верхний фронт вещества и энергии, который распространяясь вглубь верхних слоев литосферы (т.е. вглубь почвообразующих пород), формирует вертикальную (по глубине) неоднородность – анизотропию почвенной системы и обособляет веществом и энергетически общую зону педогенеза и выветривания.

Основной причиной возникновения вертикальной (глубинной) составляющей анизотропии в функционировании, составе и структуре почвы является разная глубина проникновения разных факторов в толщу литосферы. Происходит как бы отбор – селекция разных потоков, веществ и организмов самой твердофазной толщей почвы и почвообразующей породы на способность проникнуть вглубь этой толщи. В результате на разных глубинах зоны почвообразования и выветривания возникают разные комбинации условий тепла, влаги, обитающих организмов и т.д., что и обеспечивает разное функционирование системы на разных глубинах, а при большой длительности такого функционирования и обособление состава и структуры твердой фазы.

По общему характеру функционирования можно выделить три общие и универсальные для всех почв зоны функционирования: ортофункциональную, парафункциональную и метафункциональную.

**Ортофункциональная зона** начинается в подавляющем большинстве случаев с поверхности почвы и распространяется на разную, но в основном небольшую глубину первых десятков см. Функциональная суть этой зоны заключается в том, что она воспринимает действие всех или почти всех факторов почвообразования, действующих у поверхности почвы. На эту зону влияют и очень сильные потоки и циклы, которые, пройдя сквозь нее, уходят вглубь почвы: потоки тепла теплых сезонов, инфильтрация растворов после влажных сезонов,

после снеготаяния, глубокие корни деревьев и многолетних аридных кустарников, глубокие ходы крупных землероев, многолетние циклы тепла и влаги и др. Вместе с тем, эта же зона испытывает воздействие многих гораздо более высокочастотных и более слабых “факторов”, практически всех, которые действуют на дневной поверхности: внутрисуточные и суточные колебания тепла и влажности, слабые и короткие морозящие дожди, поверхностные корневые системы трав и некоторых деревьев, поверхностные контакты со слоевищами мхов и лишайников. Эти факторы могут своим действием охватывать или всю ортофункциональную зону в почвах, или косвенным образом влиять на процессы в глубже лежащей парафункциональной зоне. Ортофункциональная зона как и пара- и метазоны могут иметь разную сущность в зависимости от фактора функционирования: ортогидрологическая, которая получает и воспринимает все, даже самые незначительные по частоте и мощности атмосферные осадки, ортотепловая – воспринимающая все частотные колебания потоков тепла и холода. Наиболее интересным представляется выделение ортобиологической зоны. Это зона почвы, населенная наибольшим количеством всех видов почвенной фито- и зообиоты (макро-, мезо-, микро-). Как правило, распределение живой почвенной биомассы имеет аккумулятивный характер с максимумом в верхней части профиля.

**Парафункциональная (парабиотическая зона)** функционирования залегает под ортозоной и отличается тем, что не имеет прямого контакта с поверхностным фронтом факторов. Потоки тепла, влаги (растворов) и газов приходят в паразону уже в значительной степени “отфильтрованные” и трансформированные верхней ортозой. Их агрессивность по отношению к веществу литосферы может быть значительно снижена, вследствие буферной роли ортозоны. Однако в ряде случаев промывного гумидного почвообразования агрессивность растворов, выходящих из ортозоны и входящих в паразону, может усиливаться за счет кислых органических веществ, захватываемых нисходящими потоками влаги из подстилок и гумусовых горизонтов ортобиотической зоны. Паразона “не чувствует” многие мелкочастотные и слабые потоки и циклы тепла и влаги, действующие на поверхности почвы, а колебания более сильных потоков и циклов доходят до паразоны с запозданием во времени и в сглаженном модифицированном виде. Парабиотическая зона почвенной системы содержит существенно меньше живой биомассы во всех ее видах: корневой, зообиоты, микроорганизмов. Как правило, это примерно 15–20% от общего запаса живой биомассы в общей зоне почвообразования. В паразоне прямое действие биоты на вещество литосферы уже не является определяющим и ведущим ни в биогеохимическом, ни в биомеханическом смысле. Но оно играет немаловажную роль в процессах корневого питания и водопотребления. На первое место в этой зоне выходят процессы, связанные с элювированием веществ из ортобиотической зоны, и процессы трансформации вещества литосферы на месте, *in situ*, причем трансформации как минералого-геохимической, так и агрегатно-структурной. Таким образом, паразона формируется под не прямым а косвенным влиянием ортобиотической зоны, которая “отдает” вниз, в паразону, растворимые и суспензированные продукты трансформации и разрушения-разложения минерального вещества литосферы и органического вещества биосферы.

Глубже паразоны залегает **метафункциональная зона** почвенной системы. Она имеет очень опосредованную связь с поверхностным фронтом факторов. Многие мелко-, средне-, и даже низкочастотные колебания и ритмы потоков и циклов тепла, газов и растворов не доходят до этой зоны. Она наверняка не

“чувствует” суточные и сезонные колебания, а во многих случаях в ней не отражаются даже и годовые колебания. Водно-тепловая и биотическая динамика этой зоны изучена крайне слабо. Известно, что на нее оказывают влияние экстремальные годы и серии лет с повышенной гумидностью или аридностью (жаркие, холодные). Можно думать, что метазона живет в довольно стационарном водно-тепловом и геохимическом режиме, реагируя в основном на экстремальные колебания факторов почвообразования. Метабиотическая зона характерна резким снижением разнообразия и массы биоты в сравнении с вышележащими орто-, и паразонами. В ней могут встречаться отдельные глубокие корни деревьев и кустарников (например, тянущиеся к глубже лежащей зоне грунтовых вод в аридных областях), одиночные ходы землероев, однако, они мало что определяют в биотическом режиме этой зоны. Основную живую биомассу биоты в этой зоне составляют, по-видимому, микроорганизмы, однако, по отношению к общему запасу биомассы во всей почвенной толще они составляют не более 1–5%. Метабиотическая зона, по существу, является практически абиотической в том смысле, что деятельность биоты в ней является минимальной, а ее влияние на превращение вещества литосферы – очень незначительной и неопределяющей. В этой зоне, вследствие плавных и небольших колебаний температуры и влажности и отсутствия “роющей” зоо и фитобиоты, практически исчезают или минимизируются процессы переобструктурирования и турбации вещества литосферы. Ведущими процессами здесь становятся медленно протекающие процессы водно-температурного выветривания возможно с участием микроорганизмов и растворенной угольной кислоты.

Такова в общих чертах вертикальная анизотропия зон функционирования во всей толще почвы и коры выветривания в том случае, когда они являются синхронными и сингенетичными системами по отношению к материнским породам верхней литосферы. В такой идеальной модели функционирования разделение почвы и коры выветривания на две принципиально разные системы не имеет большого смысла, поскольку они в значительной степени вложены друг в друга: обе начинаются от дневной поверхности, от био-атмосферного фронта атаки, обе простираются на всю мощность толщи, которая пронизывается экзогенными факторами и где происходят взаимодействия этих факторов с веществом литосферы, обе заканчиваются там, где заканчивается атмо-, гидро-, био взаимодействие с литосферой. В обычной практике почвенных и геологических полевых исследований нижнюю границу почвы обычно проводят по нижней границе парабиотической зоны, а метабиотическую зону относят или к собственно коре выветривания или к рыхлым осадочным породам.

Однако это только разделение по признакам функционирования, которые могут быть тестированы замерами тепла и влаги, их колебаний, обнаружением обменных реакций между растворами и твердой фазой, наконец, обнаружением разных количеств и разного состава почвенной биоты. Важно понять как эта анизотропия функционирования почвенной системы запечатливается (отражается, запоминается) в составе, строении и пространственной организации твердой фазы в процессе изменения исходной литосферной литоматрицы в педосферную педоматрицу, т.е. говоря общесистемным языком как многофазное функционирование системы отражается в ее твердофазной структуре.

С этих позиций, в твердофазной толще почвообразования и выветривания можно выделить (Черняховский) три зоны изменения вещества литосферы, в значительной степени коррелирующих с выделенными выше зонами функционирования. Это, конечно, обобщенная идеализированная модель, основанная на наиболее широко распространенных примерах почв и кор выветривания.

**Ортоструктурная зона.** Начинается от дневной поверхности и может иметь разную мощность от 50–60 см, в случае гумидных и семигумидных богатых биотой и гумусом почв, до 5–10 см, в случае холодных и аридных почв. Для этой зоны прежде всего характерно наиболее ярко выраженное изменение состава и организации исходного почвообразующего материала литосферы, как по химико-минералогическому составу, так и по строению, структуре. Благодаря обитанию биоты и наиболее контрастным температурным перепадам в этой зоне, минеральное вещество породы здесь максимально дезинтергрировано в сравнении с исходными структурами пород как плотных консолидированных (граниты, базальты, песчаники и др.), так и рыхлых ортоструктурных (глины, суглинки, лессы и др.). Вместе с тем, мелкозем этой зоны обычно педогенно ортоструктурен, причем структура эта очень динамична, ввиду максимальной активности корневых систем растений, почвенных беспозвоночных, наличие гумуса, максимально частым и контрастным циклом промерзания-протаивания и/или увлажнения (набухания) и высыхания (сжатия). Срок жизни почвенных агрегатов-педов в этой зоне минимальный, они постоянно разрушаются и вновь образуются биогенными, термогенными и гидрогенными процессами. Это означает, что в этой зоне минеральные частицы пород литосферы, и глинистые, и скелетные минимально заключены в консервативные устойчивые долго живущие структуры (кроме щебня в каменистых почвах) и максимально “открыты” для воздействия агрессивных биоклиматических факторов, непосредственно действующих на эту зону. Динамика структуры и минеральной массы в этих горизонтах тесно связана также с максимально активными процессами турбации твердой фазы, как внутри так и межгоризонтной. В тесной связи, и во многом благодаря такой активной динамикой структуры мелкозема, которая открывает путь веществам-агрессорам почти к каждой индивидуальной минеральной частице, в этой зоне происходит и наиболее активное химико-минералогическое изменение твердого вещества литосферы. Здесь действуют наибольшие массы атмосферных осадков и почвенных растворов, содержащих угольную, многие неспецифические органические кислоты, гумусовые кислоты, комплексообразователи, агрессивные корневые выделения, экзоферменты микробов и множество других биогенных и абиогенных агрессивных веществ и факторов. В результате, именно в этой зоне наблюдается наиболее значимые явления физического, химического и биохимического разрушения и изменения исходного минерального вещества литосферы: появление новых гранулометрических фракций, новых и/или трансформированных минералов, частичное или полное разрушение и растворение минералов породы. Разумеется степень трансформации вещества литосферы в этой зоне решающим образом зависит от биоклиматических условий педогенеза и геохимической обстановки в самой зоне, так же как и от степени устойчивости пород и минералов литосферы к педогенной трансформации. В аридных и крайне холодных областях педогенная трансформация в этой зоне охватывает только легкорастворимые соли, гипс и карбонаты, оставляя нетронутыми силикаты. В бореальных и умеренных гумидных областях в трансформацию вовлекаются и слабо-, средне- устойчивые силикаты (биотит, средне-основные плагиоклазы и др.). В тропических гумидных областях при достаточной длительности процессов педогенеза разрушению подвергаются и сильно-устойчивые силикаты (мусковит, К, Na полевые шпаты и др.).

Кроме процессов трансформации и разрушения минералов литосферы в этой зоне действуют еще две группы противоположно направленных процессов, изменяющих состав литосферы: элювиальные процессы выноса веществ в растворах и суспензиях вглубь и за пределы почвы по гравитационному гради-

енту и “антигравитационные” процессы биогенного накопления органического вещества и элементов питания растений, сначала в живой, затем в мертвой биомассе опада и подстилки и, наконец, в гумусовых горизонтах почв. Элювиальные процессы выносят из этой зоны все соединения и частицы, способные передвигаться в нисходящем гравитационном потоке почвенной влаги. По переходе от аридных к все более гумидным условиям почвообразования в этот поток включается все большее разнообразие выносимых веществ: от легкорастворимых солей, сульфатов и карбонатов до растворов Si, Fe, Al и суспензий пылеватых и илистых частиц. Препятствием к элювиальному выносу из этой зоны служат два основных механизма: пассивный – водоудерживающая способность почвы и внутренние геохимические барьеры в твердой фазе (сорбционные, щелочно-кислотные и др.) и активный – избирательный перехват элементов питания растений из растворов корневыми системами, главным образом N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, и ряда микроэлементов.

Процессы биогенного круговорота веществ между подземной и надземной частями экосистем и вообще биосферы суши играют огромную, но очень неоднозначную роль в изменении состава и свойств литосферы в зоне почвообразования. С одной стороны, корневые системы извлекают зольные элементы из всей корнеобитаемой зоны, включая элементы, переходящие в растворы из сорбированного состояния и преобладающей массы силикатных минералов почвы. Эти элементы “перекачиваются” в надземную часть экосистемы и входят в состав вновь синтезированного органического вещества надземной биомассы. Отмирание, опадание этой биомассы на поверхность почвы и ее последующая абиогенная и биогенная деструкция, разложение, гумификация приводят в конечном счете к обогащению верхней ортозоны почвенной литосферы органическим веществом и биогенно аккумулярованными зольными элементами в большинстве почв мира. Это одна из важнейших “литосферных” функций биогенного круговорота и его почвенного звена в изменении состава и структуры литосферы. Однако необходимо иметь в виду и другую сторону этих биосферно-биокруговоротных процессов. В целом, несмотря на многочисленные звенья, восходящая часть биогенного кругооборота избирательно захватывает вещества в корнеобитаемой зоне из минерального вещества литосферы, из средне и сильносвязанных сорбционных и силикатных форм, не слишком доступных для быстрого выноса за пределы почвенной толщи. Поступив в живую биомассу, а затем и в мертвую массу опада и подстилок, эти извлеченные элементы оказываются в несравненно менее стойких и гораздо более растворимых формах и гораздо легче становятся “добычей” процессов выщелачивания и выноса из почвенной системы, чем в форме силикатов, оксидов и сорбированных веществ. Таким образом, наряду с аккумуляцией биофильных элементов из всей корнеобитаемой зоны и поверхностных горизонтов почвы, биогенный круговорот одновременно “подставляет” их в легко растворимых и выщелачиваемых формах опадов и подстилок на поверхности почвы под действие вертикальных и латеральных гравитационных потоков влаги. Эти потоки, в особенности поверхностный и внутрипочвенный боковой сток, ежегодно “вырывают” из биогенного цикла элементов существенную долю и переносят их или в соседние почвы и экосистемы или в речной сток. Иными словами, в очень многих почвах биогенный круговорот биофильных элементов играет и поверхностно-аккумулятивную роль и элювиальную роль по отношению к исходному веществу литосферы, вовлеченной в педогенез. В итоге, степень биогенной аккумуляции органического вещества и зольных элементов в ортоструктурной зоне почвенной системы является функцией динамического соотношения, часто и

равновесия между собственно процессами аккумуляции и процессами разрушения, минерализации и элювирования отмершей биомассы.

В целом, ортоструктурная зона является одновременно: зоной максимальной переоструктурирования и педотурбаций, зоной максимальной биогенной аккумуляции органического вещества и биофильных элементов, зоной максимальной трансформации и разрушения минерального вещества, зоной максимального элювирования веществ, не удерживаемых биогенным круговоротом, за пределы этой зоны. Такое сложное сочетание разнонаправленных процессов и их результатов обуславливают наибольшую сложность и измененность вещества этой зоны в сравнении с исходным материалом литосферы. В состав ортоструктурной зоны могут включаться органоаккумулятивные, гумусовые, часто элювиальные и реже верхние части иллювиально-метаморфических горизонтов.

**Параструктурная зона.** Залегает под ортозоной и является внутренней частью почвенной толщи. Ее мощность колеблется от 20–50 см в маломощных холодных и аридных почвах до 1–3 м в гумидных бореальных и тропических областях. Для этой зоны характерно, прежде всего, то, что она не подвергается непосредственному воздействию поверхностного фронта атмосферных и биотических потоков и циклов. В паразоне существенно снижается общая агрессивность биоатмосферных факторов по отношению к минеральному веществу литосферы, как в физико-гранулометрическом, так и в химико-минералогическом аспектах. Ослабление процессов термической и фито-зоогенной дезинтеграции, переоструктурирования и турбации исходного почвообразующего материала позволяет сохраняться фрагментам относительно неизмененного по составу и/или по структуре вещества породы. Резкое ослабление фито-зоогенного и гумусового оструктурирования приводит здесь к преобладанию абиогенных физических, физико-химических и химических механизмов оструктурирования: набухание-сжатие, растрескивание, иллювиирование глин, осаждение и коагуляция различных цементирующих веществ из растворов и др. Гумусообразование на месте, биогенная аккумуляция элементов, также как и прямое воздействие биоты на минеральное вещество, – в этой зоне резко снижают свою интенсивность и отходят на второй план или вовсе отсутствуют. Также резко снижается агрессивность потоков влаги и растворов по отношению к минеральному веществу литосферы – их способность к разрушению и трансформации силикатных минералов и элювированию продуктов из зоны реакции. Решающую роль в изменении состава вещества литосферы в этой зоне приобретают иллювиальные и/или метаморфические процессы. Первые приносят широкий спектр веществ из вышележащей зоны; в зависимости от типа педогенеза – от солей и карбонатов до соединений Si, Al, Fe и гумуса и пылеватых и илистых суспензий. Метаморфические процессы изменяют собственно вещество этой зоны *in situ* под влиянием менее агрессивных и более “мягких” усредненных растворов, приходящих из ортозоны. Эти процессы могут быть очень разнообразными, от простого растворения солей, гипса, карбонатов до сложнейших процессов гидролиза и ферролиза силикатов, трансформационного стадийного их изменения и синтеза глинистых минералов. Изменение твердой фазы параструктурной зоны может происходить в весьма разных режимах: промывных и непромывных, глеевых и окислительных, кислых, нейтральных или щелочных. К этой зоне относится обширная ассоциация иллювиально-метаморфических горизонтов почв мира.

**Метаструктурная зона.** Самая глубокая зона почвенной толщи, которая часто даже не включается в состав почвенного тела, профиля и рассматривается как самостоятельная система коры выветривания.

Ее мощность составляет от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров в зависимости от влагоемкости субстрата и гидротермических особенностей. Сюда проникают в основном растворы, своим генезисом связанные с педосферой. Здесь преимущественно развиты абиотические процессы, хотя в отдельных случаях локально присутствует биота (корни некоторых растений, например, люцерны, сосны, могут проникать в метазону). Следует остановиться на аномальных, по Докучаеву, почвах, растущих кверху в результате поступления материала: пойменные почвы, вулканические, намывные и многие другие. В этом случае ранее развитые почвы постепенно превращаются сначала в паразону, а затем в метазону, и сохранившийся внизу исходный минералогический материал резко замедляет свое превращение в связи со снижением активности функций трансформации субстрата. В то же время, богатство погребенных слоев гумусом, биотой обуславливает более высокую их активность и более интенсивное разложение минералов не только в этих слоях, но и в подстилающей подпочве. В полной мере идет педолиз – разрушение подстилающих почву пород самой почвой. В то же время идет и противоположный процесс – превращение бывшей почвы в осадочную породу, в которой сохраняются некоторые остаточные признаки почв. Как правило, осадочные породы содержат до 0,3% С органического, в то время, как в изверженных породах содержание С составляет сотые доли процента.

Таким образом, влияние почвы на литосферу достаточно велико, вплоть до формирования новых осадочных пород и эта глобальная функция почвы прослеживается по своему действию всюду, где формируется самый тонкий почвенный слой.

## *Глава 2*

### **ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОЧВ И ПОЧВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ГИДРОСФЕРУ**

Гидрогеологи выделяют гидросферу как одну из оболочек планеты. На суше гидросфера не только взаимодействует с почвой, но проникает в нее. Можно рассматривать воду в почве как часть гидросферы. При этом ясно, что химизм всей гидросферы в определенной степени зависит от почв и характера взаимодействия осадков стока с почвами.

В хорошо аэрированных почвенных растворах, доминируют самые разные комплексы (табл. 59). Свободные ионы и комплексы размещены в порядке снижения их доли от общего содержания элемента в растворе. В почвенном растворе может содержаться от 100 до 200 различных растворимых комплексов. При низких значениях рН среды в растворах доминируют свободные ионы и протонированные анионы, при высоких значениях рН – карбонатные и гидроксидные комплексы.

#### **Элементный состав поверхностных вод континентов**

Постоянство солевого состава океана, которое установлено многочисленными исследованиями, возможно лишь при условии сбалансированности и стабильности потоков химических элементов через геохимические барьеры гидросферы. В течение года происходят значительные сезонные изменения поставки



Химический состав почвенных растворов [Sposito, 1994]

Катион	Химический состав	
	Кислые почвы	Щелочные почвы
Na <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup> , NaHCO <sub>3</sub> <sup>0</sup> , NaSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Mg <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup> , MgSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , MgL <sup>*</sup>	Mg <sup>2+</sup> , MgSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , MgCO <sub>3</sub> <sup>0</sup>
Al <sup>3+</sup>	AlL, AlF <sup>2+</sup> , AlOH <sup>2+</sup>	Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup> , AlL
Si <sup>4+</sup>	Si(OH) <sub>4</sub> <sup>0</sup>	Si(OH) <sub>4</sub> <sup>0</sup>
K <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	K <sup>+</sup> , KSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> , CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , CaL	Ca <sup>2+</sup> , CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>
Cr <sup>3+</sup>	CrOH <sup>2+</sup>	Cr(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Cr <sup>6+</sup>	CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Mn <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , MnSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , MnL	Mn <sup>2+</sup> , MnSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , MnCO <sub>3</sub> <sup>0</sup> , MnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , MnB(OH) <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup> , FeSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , FeH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	FeCO <sub>3</sub> <sup>0</sup> , Fe <sup>2+</sup> , FeHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , FeSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>
Fe <sup>3+</sup>	FeOH <sup>2+</sup> , Fe(OH) <sub>3</sub> <sup>0</sup> , FeL	Fe(OH) <sub>3</sub> <sup>0</sup> , FeL
Ni <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup> , NiSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , NiHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , NiL	NiCO <sub>3</sub> <sup>0</sup> , NiHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , NiB(OH) <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Cu <sup>2+</sup>	CuL, Cu <sup>2+</sup>	CuCO <sub>3</sub> <sup>0</sup> , CuL, CuB(OH) <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Cu[B(OH) <sub>4</sub> ] <sub>2</sub> <sup>0</sup>
Zn <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup> , ZnSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , ZnL	ZnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , ZnCO <sub>3</sub> <sup>0</sup> , ZnL, Zn <sup>2+</sup> , ZnSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , ZnB(OH) <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Mo <sup>6+</sup>	H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , HMoO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HMoO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Cd <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup> , CdSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , CdCl <sup>+</sup>	Cd <sup>2+</sup> , CdCl <sup>+</sup> , CdSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , CdHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>
Pb <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup> , PbL, PbSO <sub>4</sub> <sup>0</sup> , PbHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	PbCO <sub>3</sub> <sup>0</sup> , PbHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , PbL, Pb(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>2-</sup> , PbOH <sup>+</sup>

\* L – органический лиганд

речной воды и содержащихся в ней веществ в отдельные регионы Мирового океана. Однако общее количество воды, переносимое за год из океана в атмосферу и возвращаемое в виде метеорных осадков и речного стока, определяется солнечной энергией и является величиной практически постоянной. По оценкам различных авторов величина речного стока находится в интервале  $3,5-4,2 \times 10^4$  км<sup>3</sup>/г. Согласно последним расчетам [Будыко, Соколов, 1974], она оценивается величиной  $4,2 \times 10^4$  км<sup>3</sup>/г. Реки ежегодно поставляют в океан около 18 млрд т твердого взвешенного вещества и влекомых наносов [Гордеев, 1884]. Оценка общего стока химических элементов разных авторов расходится (табл. 60).

Элементы, концентрация которых в речной взвеси меньше, чем в литосфере составляют небольшую группу: Na, K, Mg, Sr, Ta, Ho, Lu. К группе элементов, концентрация которых в речной взвеси и литосфере практически равны, относятся Si, Al, Fe, Ca, Ti, P, Mn, Ba, Li, Zr, Rb, Ce, Y, Co, Nd, Ga, Sm, Pr, Er, U, Eu и Tl. Концентрации большинства остальных элементов в речной взвеси значительно превышают концентрации в литосфере другой группы: S, B, Zn, V, Cr, Ni, Cu, Sc, Nb, La, Pb, As, Br, Cs, Mo, Hf, Sb, Yb, Ag, Cd и Tm. Отличительной особенностью последней из представленных групп является то, что в ее составе наиболее полно представлены элементы биофильного характера. Речная взвесь

Таблица 60

**Среднее содержание элементов в речной взвеси и оценка  
их стока в океан [Гордеев, 1984]**

Атомный номер, элемент	Концентрация в речной взвеси		Сток взвеси в океан, т/год	% взв. от суммы взв. + раств.	Суммарный сток в океан взвесь + раствор, т/год
	весовые%	г-моль/кг			
3 Li	$3,0 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^5$	85	$6,5 \times 10^5$
5 B	$7,0 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^6$	64	$2,0 \times 10^6$
9 F	$5,0 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$9,3 \times 10^6$	60	$1,3 \times 10^7$
11 Na	1,0	0,43	$1,8 \times 10^8$	48	$3,9 \times 10^8$
12 Mg	1,25	0,52	$2,3 \times 10^8$	63	$3,7 \times 10^8$
13 Al	8,3	3,1	$1,5 \times 10^9$	99,6	$1,5 \times 10^9$
14 Si	25,5	9,1	$4,7 \times 10^9$	96	$4,9 \times 10^9$
15 P	0,11	$3,5 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^7$	93	$2,2 \times 10^7$
16 S	0,15	$4,6 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^7$	10	$1,1 \times 10^8$
17 Cl	$1,6 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^6$	10	$2,0 \times 10^8$
19 K	1,5	0,38	$2,8 \times 10^8$	84	$3,3 \times 10^8$
20 Ca	2,5	0,62	$4,6 \times 10^8$	46	$1,0 \times 10^9$
21 Sc	$2,0 \times 10^{-3}$	$4,4 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^5$	99,9	$3,7 \times 10^5$
22 Ti	0,4	$8,3 \times 10^{-2}$	$7,4 \times 10^7$	99,8	$7,4 \times 10^7$
23 V	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^6$	98	$2,4 \times 10^6$
24 Cr	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^6$	98	$2,4 \times 10^6$
25 Mn	0,11	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^7$	98	$2,0 \times 10^7$
26 Fe	5,1	0,9	$9,5 \times 10^8$	99,8	$9,5 \times 10^8$
27 Co	$1,8 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^5$	96	$3,4 \times 10^5$
28 Ni	$8,4 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^6$	94	$1,6 \times 10^6$
29 Cu	$8,0 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^6$	84	$1,8 \times 10^6$
30 Zn	$3,1 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-3}$	$5,7 \times 10^6$	88	$6,5 \times 10^6$
31 Ga	$1,8 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^5$	99	$3,4 \times 10^5$
33 As	$5,0 \times 10^{-4}$	$6,7 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^4$	53	$1,7 \times 10^5$
35 Br	$5,0 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^4$	10	$9,0 \times 10^5$
37 Rb	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^6$	96	$2,3 \times 10^6$
38 Sr	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^6$	58	$4,8 \times 10^6$
39 Y	$2,7 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^5$	—	—
40 Zr	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^6$	97	$3,8 \times 10^6$
41 Nb	$3,0 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^5$	99,9	$5,6 \times 10^5$
42 Mo	$3,0 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^4$	58	$9,6 \times 10^4$
47 Ag	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^4$	75	$3,1 \times 10^4$
48 Cd	$7,0 \times 10^{-5}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^4$	62	$2,1 \times 10^4$
51 Sb	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$3,7 \times 10^4$	48	$7,7 \times 10^4$
53 I	$1,0 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^4$	6	$1,2 \times 10^5$
55 Cs	$5,2 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-5}$	$9,6 \times 10^4$	99	$9,7 \times 10^4$
56 Ba	$6,0 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^7$	87	$1,3 \times 10^7$
57 La	$4,0 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^5$	99,7	$7,2 \times 10^5$
58 Ce	$8,0 \times 10^{-3}$	$5,7 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^6$	99,6	$1,5 \times 10^6$
59 Pr	$8,3 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^5$	99,8	$1,5 \times 10^5$
60 Nd	$4,2 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$7,8 \times 10^5$	99,7	$7,8 \times 10^5$
62 Sm	$7,7 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^5$	99,8	$1,4 \times 10^5$
63 Eu	$1,4 \times 10^{-4}$	$9,0 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^4$	99,3	$2,6 \times 10^4$
65 Tb	$1,0 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^4$	99,8	$1,8 \times 10^4$

Таблица 60 (окончание)

Атомный номер, элемент	Концентрация в речной взвеси		Сток взвеси в океан, т/год	% взв. От суммы взв. + раств.	Суммарный сток в океан взвесь + раствор, т/год
	весовые%	г-моль/кг			
67 Ho	$9,0 \times 10^{-5}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^4$	99,8	$1,7 \times 10^4$
68 Er	$2,6 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^4$	99,6	$4,8 \times 10^4$
69 Tm	$4,0 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^3$	99,5	$7,4 \times 10^3$
70 Yb	$3,0 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^4$	99,6	$5,6 \times 10^4$
71 Lu	$5,0 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$9,3 \times 10^3$	99,6	$9,3 \times 10^3$
72 Hf	$6,0 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^5$	99	$1,1 \times 10^5$
73 Ta	$1,2 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^4$	–	–
79 Au	$5,0 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$9,3 \times 10^2$	93	$1,0 \times 10^3$
81 Tl	$1,0 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^4$	–	–
82 Pb	$1,0 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^6$	98,6	$2,8 \times 10^6$
92 U	$3,0 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^4$	74	$7,6 \times 10^4$

обогащена этими элементами в значительной мере вследствие их участия в биологических процессах, а также благодаря их способности образовывать прочные комплексы с природными органическими лигандами.

В речной воде всегда содержатся растворенные органические вещества (РОВ), которые могут давать прочные соединения с металлами (табл. 61).

Одним из наиболее распространенных классов природных органических веществ (ОВ) в гидросфере и литосфере являются гумусовые кислоты. Г.М. Варшал [1988; 1993] предприняла попытку оценить на основании литературных данных и собственных исследований глобальный вынос гумусовых веществ с континентов в моря и океан. В среднем, интенсивность гумусообразования составляет  $2,5 \times 10^9$  т  $C_{орг}$  в год, при этом на каждый км<sup>2</sup> суши ежегодно поступает до 33,4 тонн гуминовых веществ (ГВ) в год. При промывании почв атмосферными осадками наиболее растворимая часть гумусовых кислот почв поступает с поверхностным и подземным стоком в воды суши, формируя фазу раствора речных вод, и далее речным стоком выносятся в моря и океаны. Реки мира выносят в моря и океаны  $316 \times 10^6$  т растворенных ОВ ежегодно, вынос растворенных ОВ с 1 км<sup>2</sup> площади суши составляет 2,71 т/км<sup>2</sup>, а показатель стока взвешенных ОВ – 1,63 т/км<sup>2</sup> в год. Суммарный показатель стока ОВ может быть в среднем оценен величиной 4,34 т/км<sup>2</sup> в год. Фульво- и гуминовые кислоты (ФК и ГК) составляют 60–80% суммы поверхностных растворенных ОВ вод, причем в соответствии с более высокой растворимостью содержание ФК, как правило, почти на порядок превышает содержание ГК и находится в интервале от 1 до 100 мг/л и более. В целом, при промывании почв атмосферными осадками в реки поступает до 13% от общего количества ГВ, ежегодно образующихся на суше.

Гумусовые кислоты представляют собой высокомолекулярные, склонные к ассоциации, полидисперсные, полифункциональные природные соединения. В их структуре показано наличие кислородсодержащих функциональных групп (карбонильных, енольных, хиноидных, лактонных и эфирных, фенольных и спиртовых гидроксидов). Высокая обменная емкость гумусовых кислот (6,0–40 мг-экв/г) обусловлена главным образом присутствием карбоксильных и фенольных оксигрупп, и именно эти элементы структуры обеспечивают образование прочных комплексных соединений гумусовых кислот с ионами металлов.

Содержание основных классов органических соединений в речной воде  
[Варшал и др., 1979]

Класс РОВ	Концентрация
Карбоновые и оксикарбоновые кислоты (муравьиная, пропионовая, щавелевая, лимонная и др.)	0,01–10 мг/л
Гуминовые кислоты	0,01–30 мг/л
Фульвокислоты	1–100 мг/л
Спирты	≤2 мг/л
Альдегиды, кетоны, полифункциональные карбонильные соединения	0,05–2 мг/л
Фенолы	0,0001–0,06 мг/л
Полифенолы	≤10 мг/л
Сахара, полисахариды	0,1–0,6 мг/л
Сложные эфиры, липиды, моно-, ди- и триглицериды алифатических кислот C <sub>12</sub> –C <sub>18</sub>	10–200 мкг-экв/л
Алифатические амины	15–50 мкг N/л
Аминокислоты	2–25 мкг/л

Комплексообразование с гумусовыми кислотами является одной из решающих сторон механизма миграции элементов в земной коре. Это относится прежде всего к таким глобальным процессам, как процессы выветривания и почвообразования (скорость разложения силикатных минералов, сульфидов, карбонатов, фосфатов увеличивается в присутствии гумусовых кислот и оксикислот индивидуальной природы на один-два порядка), процессы переноса элементов с природными водами и концентрирования с образованием рудных месторождений. Комплексообразование с гумусовыми кислотами во многом регулирует межфазное распределение элементов в природных водах и активно влияет на характер протекания процессов на геохимическом барьере река-море.

Концентрация природных комплексообразующих ОБ в поверхностных водах по крайней мере на три-четыре порядка выше, чем концентрация большинства микро- и следовых элементов, и отсюда очевидно определяющее влияние комплексообразующих ОБ на поведение микроэлементов в водах. Рассчитаны условные константы устойчивости фульватных комплексов макро- и микроэлементов природных вод по данным модельных экспериментов в системах  $Me(OH)_n$ -ФК с учетом гидролитических процессов при рН природных вод (табл. 62).

С увеличением рН существенно растет прочность фульватных комплексов металлов. Это обусловлено специфическими особенностями ФК как высокомолекулярного полидисперсного полифункционального лиганда: способностью с ростом рН к обратимой ассоциации и структурным перегруппировкам в молекулах.

Используя данные о константах устойчивости металл-фульватных комплексах и доминирующих неорганических анионах в природных водах, Варшал с сотр. [1988; 1993] выполнили теоретические расчеты содержания основных форм микро- и макроэлементов в природных водах (табл. 63). Результаты экспериментальных исследований, выполненных теми же авторами, хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Условные константы устойчивости фульватных комплексов металлов состава  
 Me : ФК = 1 : 1, ФК выделены из природных вод [Варшал и др., 1993]

Катион	pH	Метод определения	Среднее K
Ca(II)	–	pH-потенциометрический	$4,4 \times 10^3$
Sr(II)	5,0	Хроматографический на ионообменной бумаге	$3,7 \times 10^3$
Ce(III)	5,0	"	$6,0 \times 10^4$
Y(III)	5,0	"	$8,1 \times 10^4$
Fe(II)	5,0	Ионный обмен на смолах	$4,7 \times 10^4$
Fe(III)	5,0	Фильтрация через сефадексы	$1,4 \times 10^7$
Fe(III)	5,0	Метод растворимости	$1,2 \times 10^7$
Hg(II)	4,2	"	$8,0 \times 10^5$
Hg(II)	5,2	"	$1,02 \times 10^8$
Hg(II)	6,4	"	$1,7 \times 10^{11}$
Cu(II)	7,5	"	$5,5 \times 10^5$
Sb(III)	5,8	"	$8,7 \times 10^7$
Au(III)	3,5	"	$2,6 \times 10^6$
Au(III)	5,8	"	$5,6 \times 10^8$
Au(III)	7,5	"	$8,9 \times 10^9$
Ru(IV)	5,0	"	$7,3 \times 10^5$
Ru(IV)	5,0	Кинетический	$1,4 \times 10^5$
Pt(IV)	5,3	Метод растворимости	$6,8 \times 10^7$
Pd(II)	5,3	"	$2,1 \times 10^7$

Таким образом, главной миграционной формой многих элементов в речных водах являются прочные растворимые высокомолекулярные фульватные комплексы анионного типа. Комплексообразование с природными лигандами объясняет механизм самых разнообразных процессов, происходящих в зоне гипергенеза. С ним связано концентрирование ионов металлов в фазе раствора высокоцветных вод, высокая концентрация Fe(III) в поверхностных водах, на три-четыре порядка превышающую растворимость гидроксида Fe(III). Комплексообразование определяет высокую миграционную способность ряда легкогидролизующихся элементов, в том числе рутения, процессы фракционирования редкоземельных элементов в природных водах, механизм процессов коагуляции и соосаждения микроэлементов и ГК в зонах эстуариев и многие другие процессы.

Механизм процессов осаждения в зоне смешения речных и морских вод обусловлен уменьшением степени ассоциации ФК во внутренней координационной сфере ионов Fe(III) в результате конкурирующего комплексообразования при увеличении солесодержания в зонах смешения, развитием в этих условиях процессов гидролиза и гидролитической полимеризации ионов Fe(III). При высокой концентрации хорошо гидратированных ионов Ca(II) и Mg(II) дегидратация мостиковых связей, образовавшихся в процессе гидролитической полимеризации ионов Fe(III), протекает достаточно быстро. В результате происходит коагуляция полимерных гидроксокомплексов Fe(III) с ГК и наиболее высокомолекулярной частью ФК и соосаждение других легкогидролизующихся микрокомпонентов вод на геохимическом барьере река-море [Варшал и др., 1993]. Возможно, что этот процесс имеет прямое отношение к образованию железо-марганцевых конкреций и других типов осадочных месторождений.

Таблица 63

**Соотношение химических форм элементов в речных водах различного состава,  
в % [Варшал и др., 1993]**

Форма элемента	Исток р. Моск- квы; рН 5,3; С <sub>ФК</sub> = = 73,6 мг/л	р. Москва; рН 7,0 С <sub>ФК</sub> = 9, мг/л	р. Паравани; рН 7,9; С <sub>ФК</sub> = = 3,67 мг/л	р. Кура; рН 8,1; С <sub>ФК</sub> = 3,3 мг/л	р. Арагви; рН 8; С <sub>ФК</sub> = = 0,21 мг/л
<b>Ca(II)</b>					
Ca <sup>2+</sup>	56,9	91,2			
CaSO <sub>4</sub>	0,8	3,2			
CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	Не опр.	2,3			
CaФК <sup>-</sup>	42,3	2,7			
<b>Sr(II)</b>					
Sr <sup>2+</sup>	61,4	95,0			
SrSO <sub>4</sub>	0,1	0,4			
SrHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	Не опр.	2,3			
SrФК <sup>-</sup>	38,5	2,4			
<b>Fe(II)</b>					
Fe <sup>2+</sup>	11,0	28,0			
FeOH <sup>+</sup>	0,0	61,6			
FeSO <sub>4</sub>	0,2	0,9			
FeФК <sup>-</sup>	87,5	8,9			
<b>Fe(III)</b>					
Fe <sup>3+</sup>	Не опр.	Не опр.			
FeOH <sup>2+</sup>	"	1,3			
FeOHSO <sub>4</sub>	"	0,2			
Fe(OH) <sub>2</sub> Cl	"	0,02			
Fe(OH) <sub>2</sub> ФК	100,0	98,7			
<b>Cu(II)</b>					
Cu <sup>2+</sup>	0,22	3,85	2,91	2,00	2,92
CuOH <sup>+</sup>	0,01	11,80	63,46	77,96	89,66
CuHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0,004	2,75	1,70	2,31	4,67
CuSO <sub>4</sub>	–	0,15	0,03	0,03	0,003
CuФК <sup>-</sup>	99,77	81,50	31,80	17,62	2,70
<b>Hg(II)</b>					
Hg <sup>2+</sup>	–	–	–	–	–
HgOH <sup>+</sup>	–	0,31	1,51	8,83	33,11
HgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	–	–	–	–	–
HgSO <sub>4</sub>	–	–	–	–	–
HgCl <sup>+</sup>	0,08	0,40	0,11	0,42	15,50
HgФК <sup>-</sup>	99,92	99,30	98,40	90,70	49,39

Таблица 63 (окончание)

Форма элемента	Исток р. Моск- квы; рН 5,3; С <sub>ФК</sub> = = 73,6 мг/л	р. Москва; рН 7,0 С <sub>ФК</sub> = 9, мг/л	р. Паравани; рН 7,9; С <sub>ФК</sub> = = 3,67 мг/л	р. Кура; рН 8,1; С <sub>ФК</sub> = 3,3 мг/л	р. Арагви; рН 8; С <sub>ФК</sub> = = 0,21 мг/л
Au(III)					
AuOH <sup>2+</sup>	–	–	–	–	–
Au(OH) <sub>3</sub>	0,02	20,68	80,05	88,88	97,53
Au(OH)Cl <sub>2</sub>	–	0,13	–	–	–
Au(OH)ФК <sup>–</sup>	99,98	79,19	19,95	11,12	1,67
Ce(III)					
Ce <sup>3+</sup>	10,28	54,40	72,51	61,30	92,96
CeOH <sup>2+</sup>	–	0,27	2,82	3,86	4,61
CeSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	–	23,13	9,42	24,52	1,29
CeCl <sup>2+</sup>	–	0,03	0,01	0,01	0,16
CeФК <sup>–</sup>	89,72	22,20	15,23	10,30	1,66
Y(III)					
Y <sup>3+</sup>	7,95	44,25	33,11	25,06	30,67
YOH <sup>2+</sup>	0,03	8,85	52,32	63,16	61,65
YSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	–	22,57	5,30	6,15	0,52
YФК <sup>–</sup>	92,10	24,34	9,27	5,76	7,45
Ru(IV)					
Ru(OH) <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	0,87	0,004	–	–	–
Ru(OH) <sub>4</sub>	8,67	99,97	100,0	100,0	100,0
Ru(OH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–	–	–	–	–
Ru(OH) <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	–	–	–	–	–
Ru(OH)ФК <sup>–</sup>	90,47	0,02	–	–	–

В реакциях ионов металлов с ГК и ФК реализуется единый механизм взаимодействия – комплексообразование с кислородсодержащими функциональными группами лигандов. Однако вследствие различий в свойствах ФК и ГК результатом такого взаимодействия могут быть два противоположно направленных процесса: резкое увеличение миграционной способности элементов в присутствии ФК и сорбционное концентрирование элементов по механизму комплексообразования в присутствии ГК. Происходит концентрирование загрязняющих веществ, а также рудных элементов в почвах, донных отложениях углеродсодержащих породах. В общем виде подвижность элементов в водах и почвах будет определяться конкуренцией этих процессов.

### Типы геохимических барьеров на границе река-море (океан)

Применительно к условиям океана главные типы барьеров рассмотрены Е.М. Емельяновым [1977]. Для целей биогеохимии наибольшее значение имеют барьеры река-море, океан-атмосфера, вода-грунт, а также барьер организм-среда.

На барьерах река-море (в эстуариях) осаждается подавляющая часть речных взвесей (70–95%), здесь образуются огромные осадочные тела, захватыва-

ющие также подавляющую часть взвешенных в речных водах элементов. В итоге речные взвеси в океан почти не попадают и накапливаются в этой барьерной (солонатоводной) зоне, где условия резко отличаются от морских. Поэтому главная часть речных взвесей, которые якобы должны определять геохимию океанов, в океаны вообще не попадает. Именно на геохимическом барьере река-море, происходит кардинальный перелом в составе осадочного материала: от господства взвешенных форм элементов, типичного для биокосной системы речных вод, к подавляющему господству растворенных форм, типичному для биокосной системы океана, включая элементы – гидролизаты [Лисицын, 1978].

Техногенное поступление нефти в океан сейчас почти в 100 раз больше ее естественного притока. От 1/2 до 1/3 азотных, калийных и фосфорных удобрений попадает в реки и океан. По некоторым оценкам около половины всего стока взвеси в океан составляют продукты размыва пахотных земель (эрозия изымает в год на Земле около 3 тыс. га пахотных земель).

Существует классификация устьевых участков рек, приводимая Ф.П. Шепардом [1976], Е. Одумом [1975] и др. Переходную зону между сушей и морем подразделяют на дельты, лагуны, заливы, эстуарии. Геоморфологические разновидности устьевых участков включают затопленные долины рек, лиманы типа фьордов; лиманы, ограниченные отмелями, образованные тектоническими процессами, эстуарии речных дельт.

Однако при всем разнообразии геоморфологических типов устьевые участки рек объединяются одним важным свойством – изменением солёности или градиентом солёности. Изменчивость солёности вод Е. Одум [1975] считает ключевым признаком устьевых зон. Устьевые участки рек или лиманы характеризуются стратифицированностью водной толщи. D.W. Pritchard [1952; 1967] выделяет три основных гидрографических типа устьевых зон: сильно стратифицированные лиманы с “клином” солёных вод; частично перемешанный или умеренно стратифицированный лиман и полностью перемешанный или вертикально гомогенный лиман.

Химический состав речных взвесей характеризуется географической изменчивостью, которая для разных элементов проявляется по-разному. Критерием изменчивости концентрации химических элементов в речной взвеси может служить отношение  $s/m$ , где  $s$  – ошибка или размах концентрации,  $m$  – среднее значение. Наибольшая изменчивость ( $s/m > 0,5$ ) характерна для элементов, мигрирующих в реках в растворе (Ca, Na, Mg, As, Sr) или сильно обогащающих взвесь (Ag, Mo, Cd, Zn, Pb, Sr). Напротив, концентрация элементов, для которых взвесь резко преобладает над раствором (Si, Al, Fe, Ti, Ga, Hf, Sc, Th, U и РЗЭ и др.) оказывается наиболее устойчивой при смене географического положения бассейна реки ( $s/m < 0,35$ ).

Основной чертой речной миграции большинства химических элементов является преобладание взвешенной формы над растворенной (проходящей через фильтр с диаметром пор 0,5 мкм). Эта первая особенность осадочного материала речного стока в океан. Такие элементы, как Al, Fe, Mn, Ti, V, Ga, Hf, Sc и редкоземельные (РЗЭ), почти полностью (около 90%) переносятся реками во взвеси. Растворенная форма преобладает над взвешенной только для нескольких элементов – Br, J, S, Na, Ca. Это элементы, легко переходящие в раствор при выветривании.

Известно, что соотношение основных миграционных форм элементов (раствор-взвесь) в речном стоке определяется как геохимическими свойствами элемента, так и условиями окружающей среды (Eh, pH,  $t^\circ$ , наличие органического вещества). Эти условия в наиболее полной форме реализуются в корях вывет-



ривания. Таким образом, не только валовое содержание элементов в речном стоке, но и преобладание той или иной из миграционных форм (взвешенной или растворенной) варьирует в связи с климатическими условиями.

Химический состав речной взвеси, с одной стороны, и осадочных пород континентов и почв – с другой, близок по порядку величин (табл. 63). Особенно близки концентрации тех элементов, которые переносятся речным стоком в основном в составе взвеси. Большое сходство отмечается по данным, отвечающим рекам умеренной гумидной зоны [Гордеев, Лисицин, 1978; 1979], тогда как данные, полученные по тропическим рекам [Martin, Meybeck, 1979], имеют меньшее сходство с осадочными породами континентов и почвами. Martin и Meybeck [1979] объясняют это отличием условий формирования состава речной взвеси в тропической и умеренной зонах – взвесь тропических рек постоянно обогащается алюминием, железом, титаном и другими трудно-растворимыми соединениями по сравнению со взвесью остальных рек в результате интенсивного химического выветривания почв, при котором максимальная часть вещества переходит в раствор, т.е. максимально повышен вынос растворимых элементов.

Важные результаты дали анализы не только общего содержания элементов, но и форм их нахождения в речной взвеси [Gibbs, 1973; 1977; Гаранжа, Коновалов, 1977; Демина, Гордеев, Фомина, 1978]. Полученные данные показывают, что речная взвесь наследует первичные формы нахождения элементов – значительная часть Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr (от 28 до 87%) находится в составе остаточной или обломочной формы, т.е. геохимически неподвижна, зафиксирована в кристаллических решетках минералов. Наряду со сходством порядка величин концентраций химических элементов в речной взвеси и осадочных породах континентов имеются некоторые различия в их составе: U, Ta, Cs, Hf, и Ba обедняют, в то время как Cd, Zn, Pb, Ag, Mo обогащают речную взвесь по сравнению с осадочными породами континентов. Обогащение идет, по-видимому, в результате как дополнительной адсорбции последней группы элементов на тонких частицах взвеси, так и действия техногенных факторов.

R. Gibbs [1977] приводит ряд по возрастанию дифференциации тяжелых металлов в процессе их миграции от континента к океану на примере Амазонки и Юкона: Mn, Fe, Ni, Co, Cr, Cu; Mn удаляется с континентов пропорционально его содержанию в исходных породах; Fe на 17% обогащает речную взвесь Амазонки и Юкона по сравнению с исходными породами; Ni, Co, Cr и особенно резко Cu обогащают речную взвесь по сравнению с исходными породами. Для конкретных рек величина обогащенности или обедненности взвеси тем или иным элементом может существенно отличаться от соответствующих величин для мирового твердого стока. Близость взвешенного вещества рек к породам континента меняется в зависимости от зональности, она наиболее ярко выражена для рек холодной части умеренной зоны и меньше всего для рек экваториальной зоны. Это вторая общая закономерность осадочного материала, выносимого реками. Третья закономерность касается сопоставления общих количеств взвешенного и растворенного материалов, выносимых за год рекою. Это отношение выше всего в холодной части умеренной зоны и ниже всего в реках экваториальной зоны.

Элементы, резко обогащающие океанскую взвесь по сравнению с речной, – Ag, Cd, Sr, Cu, Zn, P. Однако, если нормализовать элементы по Al, который традиционно считается элементом-индикатором терригенного материала, то в круг элементов, обогащающих океанскую взвесь, войдут практически все элементы (табл. 64), за исключением Th, La, Se, Ti, Eu. Причина концентрирования эле-

Таблица 64

**Содержание некоторых химических элементов в речной и океанской воде,  
почвах, осадочных породах континента и пелагических осадках**

Эле- мент	Речная взвесь, $n \cdot 10^{-4}\%$		Взвесь, % от суммы (взвесь + раст- вор)		Осадочные поро- ды континентов, $n \cdot 10^{-4}\%$		Почвы, $n \cdot 10^{-4}$ %	Океан- ская взвесь, $n \cdot 10^{-4}$ %	Про- цент взвеси от сум- мы, взвесь+ раст- вор	Пела- гичес- кие осадки, $n \cdot 10^{-4}$ %
	А	Б	А	Б	В	Г				
Ag	0,13	-	77,4	-	0,07	-	-	7	3	-
Al	83000	94000	99,6	99,9	95000	-	71000	5500	52,4	53200
As	-	5	-	56	6,6	-	5	-	-	17
Au	-	-	-	-	0,001	-	-	-	-	-
B	-	70	-	62	-	-	10	-	-	251
Ba	380	600	91	81	800	-	500	190	0,5	2593
Br	-	5	-	10	-	-	-	-	0,01	-
Ca	25000	21500	45,8	48	25000	-	13700	-	0/01	136000
Cd	0,7	1	64,7	-	0,35	-	0,5	8,4	3,2	-
Ce	64	95	-	99,8	67	-	50	35	-	-
Co	18	20	96,6	97,5	20	-	8	6	6,2	65
Cr	130	100	98,5	97,5	100	-	200	80	12,0	60
Cs	5,2	6	99/0	98/6	1/2	-	5	2	0,00	-
Cu	80	100	85,5	81	57	-	20	450	7,9	237
Er	2,6	3	-	99,7	1,9	-	-	-	-	-
Eu	1,4	1,5	-	99,8	-	1,1	-	0,1	-	-
Fe	51000	48000	98,5	99,8	-	33300	3800	6400	20,6	38000
Ga	18	25	98,8	99,1	-	4,3	-	-	-	-
Gd	5,7	5	-	99,6	-	4,3	-	-	-	-
Hf	2,9	6	-	-	-	6	-	0,5	-	4,2
Ho	0,9	1	-	99,7	-	0,61	-	-	-	-
K	15000	20000	78,8	86	-	22800	13600	-	-	13000
La	39	45	99,0	99,7	-	20	-	2	3,9	-
Li	50	25	91,2	50	-	60	30	17	0,01	29
Lu	0,5	0,5	-	99,5	-	0,33	-	0,14	25	-
Mg	12500	11800	62,7	60	-	14000	6000	-	-	14200
Mn	1100	1050	98,3	98,0	-	700	850	150	7,0	2800
Mo	5,8	3	75,4	70	-	2	3	4	0,1	4,2
Na	10000	7100	42,5	37	6600	-	6300	-	-	18000
Nd	42	35	-	99,7	16	-	-	-	-	-
Ni	84	90	94,5	95	95	-	40	100	5,7	97
P	600	1150	94,1	92	740	-	800	3000	0,33	-
Pb	147	150	98,8	98	20	-	10	150	50	97
Pr	8,3	8	-	99,8	70	-	-	-	-	-
Rb	122	100	96,6	97	200	-	60	54	0,01	44
Sb	2	2,5	51,4	55	1,5	-	-	2,4	0,33	1,6
Sc	20	18	99,9	99,9	10	-	-	1,2	27,2	14
Si	255000	285000	95,6	95,6	239000	-	330000	30000	0,31	196000
Sm	7,7	7	-	99,7	6,7	-	-	-	-	-
Sr	270	150	73,7	59	450	-	300	3600	0,01	755
Ta	1,0	1,25	-	-	3,0	-	-	-	-	-
Tb	1,0	1,0	-	99,7	1,0	-	-	-	-	-
Th	7,1	1,4	97,5	98	11	-	0,3	37,5	-	7,7

Таблица 64 (окончание)

Элемент	Речная взвесь $n \times 10^{-4}\%$		Взвесь, % от суммы (взвесь + раствор)		Осадочные породы континентов, $n \times 10^{-4}\%$		Почвы, $n \times 10^{-4}\%$	Океанская взвесь $n \times 10^{-4}\%$	Процент взвеси от суммы, взвесь + раствор	Пелагические осадки, $n \times 10^{-4}\%$
	А	Б	А	Б	В	Г				
Ti	4000	5600	99,9	99,6	4300	4600	180	2,9	–	3400
Tm	0,4	0,4	–	99,3	0,45	–	–	–	–	–
U	1,2	3	55,7	97	3,2	1	1,1	0,01	–	2,2
V	126	170	98,5	98,6	130	100	30	0,53	–	96
Yb	2,8	3,5	96,6	99,7	1,8	–	–	–	–	–
Zn	310	350	88,9	83	80	50	1200	5,7	–	130
Zr	200	–	97,7	–	200	–	–	13,0	–	124

А – Гордеев, Лисицин, 1978; Б – Martin, Meybeck, 1979; В – Виноградов, 1950; Г – Turekian, 1974; Е – Гордеев, Лисицын, 1979; Ж – Лисицин, 1978.

ментов в океанской взвеси лежит в специфике их океанской миграции, сочетающей интенсивно протекающие адсорбционные процессы наряду с биогенным фракционированием [Гордеев, Лисицин, 1979]. Океанская взвесь отличается от речной не только обогащенностью относительно Al рядом химических элементов, но и иным минеральным составом, иным соотношением форм нахождения элементов. В океанской взвеси, особенно в пелагических частях океана, господствует гидрогенная форма нахождения металлов, составляющая до 80–99% от общего содержания металлов во взвеси [Демина, Фомина, 1978]. Главное различие в химическом составе и соотношении миграционных форм элементов в речном стоке и водах океана в том, что в океанах резко преобладает практически для всех элементов растворенная форма, составляющая (табл. 64), от 47,6% для Al до 99,9% для Li, Br, Cs, Ca и других элементов. Даже для элементов – гидролизатов, для которых ранее основной считали взвешенную форму, в водах океана, преобладает растворенная форма. Повышение роли растворенной формы миграции элементов наряду со снижением доли обломочной формы во взвеси на литологическом профиле от устья рек к пелагиали свидетельствует об увеличении миграционной способности элементов в океане.

Сравнение среднего содержания элементов в речных взвесах с глубоководными океанскими осадками показывает, что, так же как и при сравнении речных и океанских взвесей, элементы разбиваются на три группы (табл. 64).

1. Большинство элементов, в том числе порообразующие – Si, Al, Fe, Mg, Ti, K и малоподвижные микроэлементы – РЗЭ, Sc, Yb, V и др., находятся в осадках и взвесах примерно в равных концентрациях. Для элементов этой группы, несмотря на барьер река-море, речной сток является важным агентом поставки в осадки океана.

2. Ко второй группе относятся Tl, Cd, Zn, Rb, Cr, это элементы, обогащающие речную взвесь по отношению к океанским осадкам. Можно предположить, что обогащение происходит за счет антропогенного фактора. Однако сюда не входят такие “элементы-загрязнители” как Pb, Ag, Sb, As, хотя их концентрации и несколько выше в речных взвесах, чем в осадках (кроме As). Речные взвеси, очевидно, загрязнены этими металлами, однако обогащенность ими пелагиче-

ских осадков за счет других процессов (например, адсорбции из морской воды) оттесняет эти элементы к первой из названных групп.

3. Третью группу составляют элементы, обогащающие пелагические осадки в сравнение с речной взвесью, – Ba, Ca, B, As, Co, Cu, Mn, Sr, P. Такие элементы как Ba, Ca, B, Sr, P, As, – присутствуют в речном стоке в значительной мере в растворенном виде. Пелагические осадки в среднем в пять раз более богаты  $\text{CaCO}_3$ , чем речные взвеси. Накопление Ca, Ba, Sr, P и других элементов в осадках океана идет за счет мощных биогенных процессов извлечения растворенных форм элементов и перевода их на дно. Mn, Cu, Co сильно концентрируются Fe–Mn конкрециями и присутствуют в осадках в значительной мере в аутигенных (гидрогенных) формах. Таким образом, для элементов этой группы речной сток имеет, по-видимому, подчиненной значение по сравнению с другими механизмами поступления на океанское дно.

При смешении речных вод с морскими на геохимическом барьере река-море происходят многочисленные и разнообразные гидродинамические, физико-химические и биологические явления: замедление течения речных вод, осаждение крупных фракций взвешенного материала, коагуляция тонких глинистых частиц, разбавление речной воды, насыщение ее солями морской воды, физико-химическое взаимодействие веществ, не сводящееся к простому разбавлению (флокуляция органических веществ и металлов, сорбция-десорбция), “вспышки” жизни.

Наиболее важным показателем речного стока служит мутность или концентрация взвешенного материала. В реках мира средняя величина мутности составляет 510 мг/л, а в водах Мирового океана – 0,1–0,2 мг/л [Лисицин, 1974]. Таким образом, основная часть осадочного материала, поставляемого реками, не достигает пелагиали (и лишь в небольшом количестве попадает на шельф за пределы конуса выноса). Субстрат осаждается вблизи континентов. В устье крупнейшей реки мира Амазонки осаждается более 95% терригенного осадочного материала в узкой полосе изменения солёности – от 0 до 3‰ [Milliman et al., 1975]. В дельте Миссисипи, занимающей площадь менее 1% от площади Мексиканского залива, задерживается более 90% твердого стока реки [Trefrey, Presley, 1976], в эстуарии р. Св. Лаврентия до 93% [Bewers, Yeats, 1977]. В прибрежной зоне Черноморско-Азовского до 83% [Демина и др., 1978] взвешенного материала выводится из водной толщи при смешении речных и морских вод. Поведение элемента-индикатора терригенного стока – взвешенного алюминия, характеризующееся резким (более чем в 20 раз) убыванием его содержания от прибрежных вод к пелагическим частям океана, показывает, что геохимический барьер река-море служит ловушкой для речного осадочного материала.

На барьере река-море уменьшение концентрации взвеси чаще всего происходит экспоненциально, взвесь выводится из воды на самых ранних фазах смешения, в основном в пределах  $S$  от 0 до 5‰. Частицы крупнее 2 мкм при смешении вод распределяются пассивно, т.е. осаждаются по гидродинамическим законам. Частицы размером меньше 2 мкм, составляющие основную часть взвешенного речного материала (около 58–70%), удаляются из воды в результате коагуляции, вызванной перезарядкой глинистых частиц или их нейтрализацией при попадании речных вод в качественно новую среду, являющуюся сильным электролитом. Кроме глинистых частиц, способность к перезарядке с последующей коагуляцией проявляют и органические коллоиды, ассоциированные с гидрокислами железа. Особенно интенсивная флокуляция происходит на ранней стадии смешения вод ( $S \leq 2‰$ ) в результате дестабилизации речного коллоидного материала, а также тонких взвешенных частиц при нейтрализации их отри-

цательного заряда катионами морской воды. При этом формируются коллоиды гидроокисного железа или железистые пленки на взвешенных частицах, которые будучи эффективными химическими адсорбентами, выводят из речных вод микроэлементы [Gibbs, 1973; Aston, Chester, 1973]. Удаление из воды устьевой зоны главной массы взвешенного материала оказывает преобразующее влияние на формы миграции многих химических элементов – как основных компонентов осадочного материала (Al, Si, Fe, Mn, Ti), так и микроэлементов (Cu, Zn, Ni, Co, Pb, Cd, Ba, C<sub>орг</sub> и др.).

Таким образом, можно подытожить обзор влияния почвенного покрова на гидросферу.

Почвенный покров территории, по которой протекает река существенно влияет на состав взвесей, их химический и гранулометрический состав.

Поскольку в первую очередь река переносит на дальние расстояния илистую фракцию, то ее химический состав определяется процессами почвообразования. Известно, что формирование илистой фракции при почвообразовании приводит к обогащению ее железом, кальцием, титаном, т.е. тем элементами, увеличение которых отмечается в речных взвесах.

В то же время в красноземных (ферраллитных) почвах ил обычно беднее железом, что приводит к отмеченному парадоксу: несколько другому содержанию веществ во взвесах рек, протекающих в зоне красноземных почв.

Если русло реки протекает через болотистую местность, то воды реки существенно обогащаются органическим веществом, что иногда приводит к заметному окрашиванию речной воды в коричневый цвет.

Распаханные почвы резко увеличивают поступление в реку более крупных гранулометрических фракций и удобрений, содержащих азот, фосфор, калий и сопутствующие им вещества.

### Глава 3

## РОЛЬ ПОЧВЫ В ФОРМИРОВАНИИ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

Газовая функция, по В.И. Вернадскому, входит в число основных биогеохимических функций живого вещества: "... эффект жизни в газовом режиме биосферы так велик, что всю совокупность газовых реакций живых веществ правильно выделить в единое целое как самостоятельную функцию, важную часть в газовом режиме планеты: N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>S" [Вернадский, 1960].

За исключением благородных газов, все компоненты атмосферы претерпевают циклические изменения, многие из которых обусловлены биологическими реакциями.

Ведущее соединение в системе тропосферных реакций – радикал ОН, образуемый фотохимически. Он участвует в циклических превращениях, причем потеря радикала из системы соответствует удалению растворимых окисленных продуктов, прежде всего вымыванию серной и азотной кислоты. Быстрее всего радикал ОН реагирует с СО, причем образуется атомарный водород Н, в быстрой реакции с О<sub>2</sub> образующий НО<sub>2</sub>, а этот последний в реакции с другими газами снова дает ОН. Удаление радикала из системы происходит с полностью окисленными соединениями, вымываемыми из атмосферы. В фотохимическую систему поступают в основном газы, продуцируемые в почве. Реакции с радика-

Компоненты атмосферы и их влияние на климат [Костина, 1997]

Фактор	Основные антропогенные источники	Время присутствия в атмосфере	Основные стоки	Фоновая концентрация в современной атмосфере	Прогноз на будущее	Потенциальное влияние на климат и изменение температуры поверхности	Масштаб влияния
CO <sub>2</sub>	Ископаемое топливо, сведение лесов, разложение в почве	4 года (Т), 2 года (С)	Океан, биосфера	353 ppm	Возрастание в год на 1–4%	Потепление (Т): 2 × [CO <sub>2</sub> ] – 1,5–4,5 °С глобально; на полюсах в 4–5 раз больше выхолаживания (С)	Глобальное, возможно, одно из основных
H <sub>2</sub> O	Процессы горения в высотной авиации	10 суток (Т), 2 года (С)	Осадки	0–30000 ppm	Возрастание	ПЭ и образование облаков и осадков (Т)	Локальное и региональное (Т); глобальное (С)
N <sub>2</sub> O	Удобрение, ископаемое топливо, авиация	150 лет	Фотодиссоциация (С)	0,31 ppm	Возрастание в год на 0,33%	ПЭ (Т): 2 × [NO <sub>2</sub> ] – 0,6 °С, влияние на баланс	Глобальное
NO <sub>x</sub>	Сжигание биомассы	4–5 суток	Сухое осаждение и окисление (Т)	0,001–0,1 ppb	На 0,33%	O <sub>3</sub> (С)	
O <sub>3</sub>	Косвенная продукция при фотохимических реакциях с другими газами	30–90 суток (Т); 2 года (С)	Каталитическое разрушение другими МГС: NO <sub>x</sub> , Cl <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> (С), сухое осаждение (Т)	0,2–0,3 ppm (Т), 5 ppm (С)	Уменьшение содержания в (С), увеличение в (Т)	Разрушение O <sub>3</sub> в (С) приводит к выхолаживанию, образование O <sub>3</sub> в (Т) – к нагреванию	Глобальное, региональное

Таблица 65 (продолжение)

Фактор	Основные антропогенные источники	Время присутствия в атмосфере	Основные стоки	Фоновая концентрация в современной атмосфере	Прогноз на будущее	Потенциальное влияние на климат и изменение температуры поверхности	Масштаб влияния
ХФМ F-11	Аэрозольные упаковки, холодильники, изоляционные материалы	50 лет	Стоки в (Т) неизвестны, в (С) разрушение	0,17–0,28 ppb	Возрастание на 6–7% с постепенным замедлением	Выхолаживание из-за разрушения O <sub>3</sub> ; потепление из-за роста содержания ХФМ; итоговый эффект не определен	Глобальное
F-12		80 лет	При фотоллизе	0,28–0,42 ppb			
CH <sub>4</sub>	Ископаемое топливо, разведение крупного рогатого скота	11 лет	Окисление ОН-радикалами, почвенные бактерии	1,6–1,7 ppb	Возрастание с постепенным замедлением	Прямое влияние на O <sub>3</sub> в (Т), (С) и ПЭ; 2 × [CH <sub>4</sub> ] – 0,25 °С	Глобальное
CO	Ископаемое топливо, лесные пожары	0,2 года	Окисление ОН-радикалами, почвенные бактерии	0,05–0,2 ppb	Возрастание	Эффект сходен с CH <sub>4</sub> , но по величине меньше	Глобальное, региональное
NH <sub>3</sub>	Ископаемое топливо, крупный рогатый скот, переработка отходов	7–10 суток	Вымывание осадками, сухое осаждение, окисление NO <sub>x</sub>	0,1–6 ppb	Возрастание с постепенным замедлением	2 × [NH <sub>3</sub> ] – 0,1 °С	Региональное
SO <sub>2</sub>	Ископаемое топливо, металлургия		Влажное и сухое вымывание, окисление в сульфаты (аэрозоль)	0,05–1 ppb	Возрастание	Кислотные дожди, влияние на формирование облачности, аэрозоль влияет на радиационный баланс; 2 × [SO <sub>2</sub> ] – 0,02 °С	Региональное

Таблица 65(окончание)

Фактор	Основные антропогенные источники	Время присутствия в атмосфере	Основные стоки	Фоновая концентрация в современной атмосфере	Прогноз на будущее	Потенциальное влияние на климат и изменение температуры поверхности	Масштаб влияния
Аэрозоль	Промышленные процессы, лесные пожары, расширение зоны пустынь	10 суток (Т), 2 года (С)	Вымывание, сухое осаждение	10 – 50 мкг/м <sup>3</sup>	Возрастание	Влияние на образование облаков, увеличивает альbedo; итоговый эффект – вероятное слабое потепление	Региональное
Альbedo поверхности	Стравливание пастбищ, урбанизация, энергозатраты, широко-масштабные проекты ирригации				Сильное повышение	Изменение альbedo поверхности, опустынивание, сведение лесов; итоговый эффект – 0,2 °С по всему земному шару	Региональное, может стать глобальным
Выбросы тепла	Производство первичной энергии		Окружающее пространство		Сильное возрастание	Влияние на испарение и атмосферную циркуляцию	Значительное локальное и региональное; глобальное маловероятно

Обозначения: (Т) – тропосфера; (С) – стратосфера, 2х – удвоение концентрации, ХФМ – хлорфторметаны; ПЭ – парниковый эффект; МГС – малые газовые составляющие.

лом ОН приводят к быстрому и полному удалению большинства газов, таких, как CH<sub>4</sub>, CO, COS, H<sub>2</sub>S, NO, NO<sub>2</sub>, и на 50% – SO<sub>2</sub>, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S, углеводородов C<sub>2</sub>–C<sub>5</sub>.

Таким образом, в тропосфере под действием фотохимического удаления реакциями с радикалом ОН происходит полное удаление продуцируемых микроорганизмами газов и возвращение в почву полностью окисленных соединений, большей частью кислот. Единственным газообразным соединением, способным нейтрализовать кислоты, является аммиак. Реагируя с кислотами, он приводит к образованию кислого сульфата аммония – соединения, очень важного для конструктивного обмена фотоавтотрофов.

В настоящее время предполагают, что ведущую роль в глобальном биосферном газообмене на континентах выполняет почвенный покров [Взаимодей-



ствии..., 1985]. Соответственно этому планетарная газовая функция почвенного покрова понимается как участие его в биосферном круговороте газов, включающее поглощение ювенильных (глубинных) газов, притекающих в современную биосферу из нижележащих слоев литосферы; образование газообразных веществ и эмиссия их в прилежащие геосферы (атмосферу и нижележащие слои литосферы); поглощение газообразных веществ из атмосферы. Почвенный покров представляет собой открытый и неоднородный в пространстве своеобразный биореактор, круговорот газообразных веществ которого осуществляет живое население. Лишь некоторые газы, такие как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и окислы азота, в малых количествах могут быть образованы в почвах абиогенно.

Разные вещества являются продуктами и в ряде случаев одновременно субстратами микробиологических реакций. В результате внутри микробной экосистемы создается трофическая структура, основанная на сети реакций, протекающих с участием немногочисленных газообразных веществ, и формируется своеобразная по составу газовая среда обитания микробного ценоза (рис. 28). Продукционный блок в газовом питании микробного ценоза почвы представлен в основном анаэробными бактериями, деструкционный – анаэробами. Состав газовой фазы почвы регулируется интенсивностью функционирования этих блоков, что в свою очередь зависит от режима влажности, температуры, содержания питательных субстратов и других свойств конкретной почвы. В оструктуренных почвах с нормальным увлажнением хорошо развито взаимодействие аэробных и анаэробных прокариотов, т.е. все звенья микробиологического круговорота газов, как продукционные так и деструкционные. При этом лишь небольшая часть продуктов анаэробного газообмена теряется почвой в атмосферу. В аридных районах, для которых характерен испарительный водный режим, в почве господствуют процессы окисления веществ до  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и т.д. Современные переувлажненные почвы и переходные к илам почвоподобные образования являются прототипами местообитания анаэробов в архее. При наличии доступного разложению органического вещества интенсивное развитие здесь получают анаэробные процессы, и состав газовой фазы почвы существенно отличается от состава атмосферы. Эти почвы являются мощным генератором и поставщиком в атмосферу восстановленных продуктов анаэробной жизнедеятельности, представляющих собой микрокомпоненты атмосферы.

В почвах практически не реализуется “идеальный” вариант, когда аэробный, переходный и анаэробный слой располагаются друг под другом, как это наблюдается в пелагических осадках. В агрегатах почв нормального увлажнения микрофлора закономерно расположена в зависимости от потребности в кислороде: анаэробы занимают центр агрегата, а его периферия занята аэробными микроорганизмами. Отсутствие  $\text{O}_2$  в центральной зоне агрегата поддерживается дыхательным процессом в его внешней части. Соотношение анаэробных и аэробных микрозон регулируется рядом факторов, в первую очередь, влажностью почвы и наличием доступного микроорганизмам субстрата [Smith, 1980].

Таким образом, почва представляет собой пористую среду, характеризующуюся широким диапазоном экологических условий и соответственно большим набором микросред обитания. Благодаря этому в ней нашли пристанище наиболее древние формы живых веществ – прокариоты, для которых почвенный покров в современной биосфере является основным резервуаром на суше.

Профильное, неоднородное в вертикальном направлении распределение в почве микроорганизмов, питательных субстратов и ряда других регулирующих газообмен параметров обуславливает формирование газовых профилей почвы

[Орлов с соавт., 1987]. Конкретный газовый профиль есть распределение определенного газообразного вещества по вертикальной координате почвенного профиля. Он формируется в результате функционирования источников и стоков газообразного вещества в почве, а также переноса этого вещества по профилю и обмена с прилежащими средами – приземной атмосферой и почвообразующей или подстилающей породой (рис. 28).

Таким образом, в масштабе планеты атмосфера, почвенный покров и литосфера представляют собой три грандиозных реактора, находящихся в состоянии газообмена. В первом образовании стока газов обусловлено в основном фотохимическими реакциями, во втором – микробиологическими процессами, в третьем – термokatалитическими процессами. Геосферы обладают своеобразными газовыми средами, в результате чего межгеосферный газообмен ведет к взаимному сближению их составов. Однако выравнивания не происходит, что объясняется специфическим характером газов внутри каждой из рассматриваемых систем. В соответствии со своим положением, располагаясь на контакте атмосферы, литосферы и наземной фитосферы, почвенный покров занимает ключевую позицию в биосферном круговороте газов на континентах.

Макросостав атмосферы сформирован главным образом геологическими процессами. Планетарная газовая функция почвенного покрова представляется сегодня как участие почвенного покрова в формировании микросостава атмосферы и посредством этого климата планеты. По существующим представлениям почвенный покров играет существенную роль в планетарном круговороте следующих природных газов:  $\text{CO}_2$ , закиси азота и метана. Циклом озона управляют фотохимические реакции. Фреоны поступают в тропосферный резервуар от холодильных установок, при распылении аэрозолей, и в меньшей степени – с вулканическими эксгаляциями, и разрушаются фотохимически в верхней тропосфере и стратосфере.

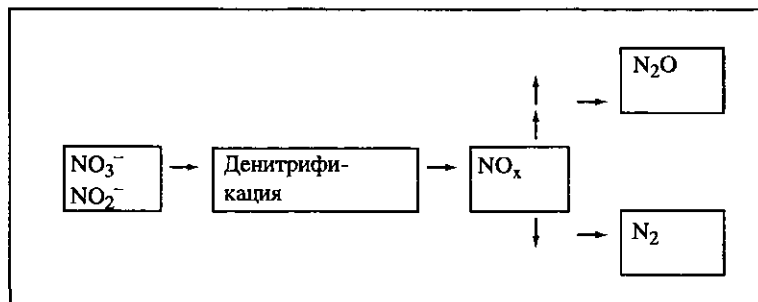
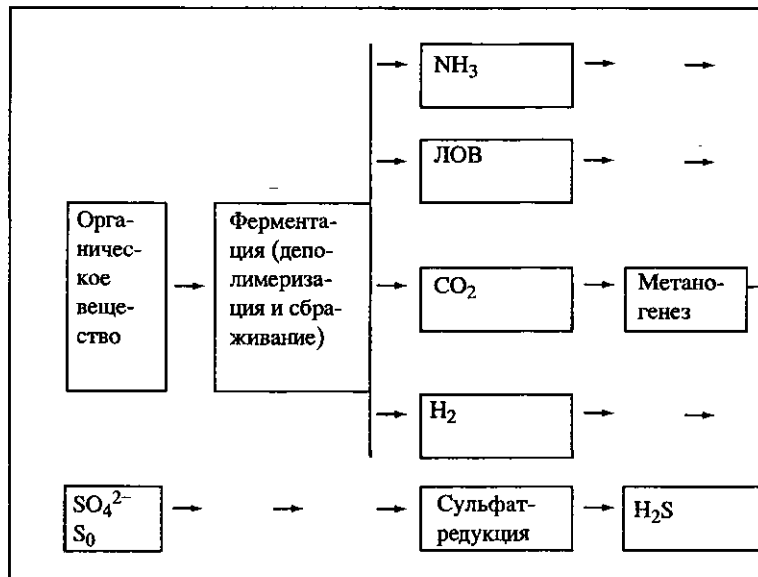
**Газообразные алканы ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  и  $\text{C}_3\text{H}_8$ ).** Относятся к числу основных органических газов осадочной толщи и атмосферы Земли. До недавнего времени считалось, что  $\text{CH}_4$  и его гомологи с геохимической точки зрения принципиально различаются. Если метан имеет биологические и геогенные источники, то зона генерации этана, пропана и более тяжелых предельных углеводородов существенно меньше и практически совпадает с таковой для нефти. Выявление образования в почвах значительных количеств  $\text{C}_2\text{H}_6$  и  $\text{C}_3\text{H}_8$  заставляет обратить внимание на почвенный покров как на один из мощных природных источников гомологов метана в атмосфере. Природа образования в почвах гомологов метана еще окончательно не выяснена. Однако уже есть основания считать, что источник этих соединений – микробный и сопряжен с биологическим образованием  $\text{CH}_4$  [Минько, 1987; Орлов с соавт., 1987].

Биогенный  $\text{CH}_4$  есть конечный продукт превращения углеродсодержащих веществ метаногенным сообществом в анаэробных зонах. Поэтому наиболее благоприятные условия для образования метана существуют в почвах длительного избыточного увлажнения (болотные, рисовые, маршевые и т.д.) и мелководных илах.

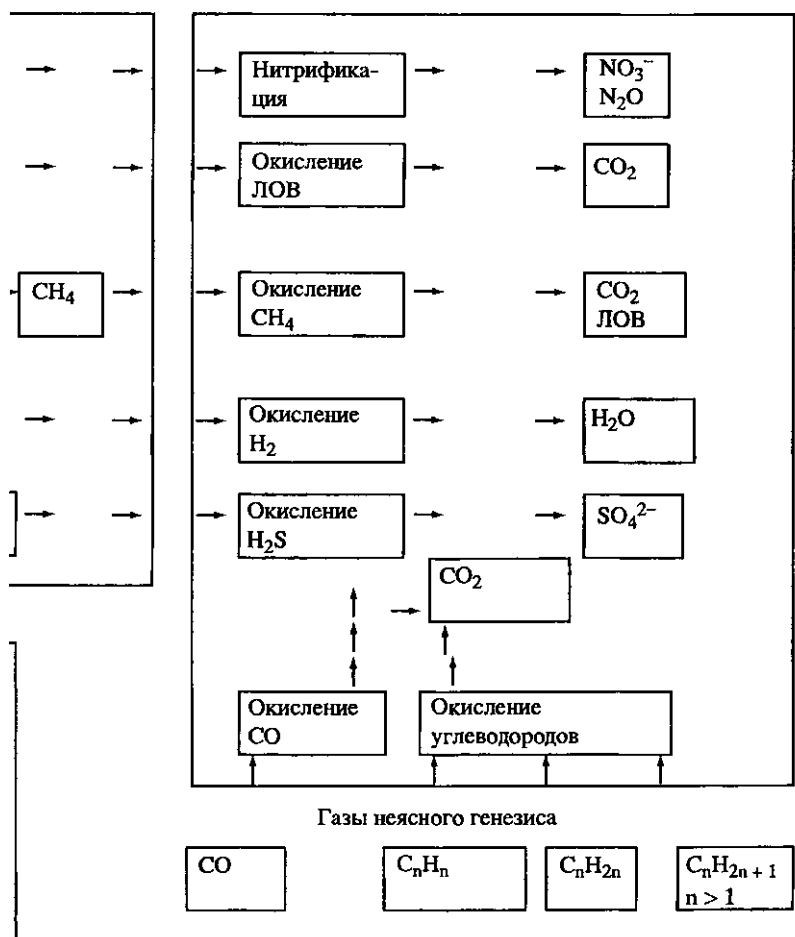
Из рассмотрения современных оценок отдельных статей тропосферного баланса  $\text{CH}_4$  (табл. 66 и 67) видно, что почвенный покров занимает ведущую позицию в системе наземных источников  $\text{CH}_4$ , обеспечивая до половины глобальной эмиссии этого газа в тропосферу.

Распределение интенсивности эмиссии  $\text{CH}_4$  различными экосистемами Земли наиболее обстоятельно рассмотрено Sheppard et al. [1982], связавшими продукцию метана микроорганизмами с общей продуктивностью экосистемы

Анаэробная зона



Аэробная зона



Глобальная эмиссия метана различными экосистемами [Sheppard et al., 1982]

Экосистема	Скорость эмиссии, г · м <sup>-2</sup> · год <sup>-1</sup>	Общий поток метана, 10 <sup>12</sup> г · год	Экосистема	Скорость эмиссии, г · м <sup>-2</sup> · год <sup>-1</sup>	Общий поток метана, 10 <sup>12</sup> г · год
Тропические влажные леса	23,5	317	Болота и топи	78,8	39
Тропические сезонные леса	19,1	80	Озера и реки	102	51
Леса умеренного пояса	14,6	79	Арктические и песчаные пустыни	0	0
Бореальные леса	13,8	62	Открытый океан	0,012	4
Лесостепи	9	28	Континентальный шельф	0,012	0,3
Саванна	9,6	137	Морские мелководья, рифы	6,9	4
Луга и пастбища умеренного пояса	4,1	15	Эстуарии	4,5	6
Тундра и альпийские луга	8,1	7	Обрабатываемые земли	6,1	34
Полупустыни	6,7	78			

(табл. 67). По данным этих авторов, основным биогенным источником  $\text{CH}_4$  является зона тропических лесов, вклад которой составляет около 1/3 глобального потока  $\text{CH}_4$  от биогенных источников. Однако в дальнейшем было показано, что тропические почвы являются скорее слабым стоком, чем источником  $\text{CH}_4$  атмосферы [Keller et al., 1986; Seiler et al., 1984]. Кроме того, полученные недавно распределения концентраций  $\text{CH}_4$  в тропосфере указывают на расположение основной источника метана в материковой зоне, севернее 40° с.ш. [Gammon, Steell, 1984]. Строение глобальных концентрационных полей других углеводородов имеет сходный характер и соответствует распределению заболоченных территорий на земном шаре [Заварзин, Кларк, 1987]. Интересно при этом отметить, что основная часть нефтегазовых месторождений расположена иначе – в районе 20–40° с.ш. Следовательно, есть основание полагать, что из числа природных источников наиболее весомый вклад в глобальное распределение атмосферных концентраций газообразных алканов вносит почвенный покров бореального климата.

Оценка скоростей эмиссии гомологов метана из почвенного покрова планеты в атмосферу представлена в табл. 68 [Минько, 1988]. В качестве первого приближения для оценки годовой эмиссии от почвы в атмосферу автор использовал пересчет исходных данных на периоды их биологической активности (ПБА). Это понятие обозначает продолжительность периода времени, в течение которого температура почвы устойчиво превышает 10° С, а запас продуктивной влаги в почве выше влажности завядания, т.е. имеют место благоприятные условия для почвенных микробиологических процессов и роста растений [Бирюкова, Орлов, 1978]. В результате проведенных расчетов учтены потоки углеводородов с более 80% площади почвенного покрова суши. Принимая во внимание, что за рамками оценок осталась широкая по разнообразию группа

←  
Рис. 28. Принципиальная схема внутрпочвенного круговорота газов [Заварзин, 1984; Заварзин, Кларк, 1987]

Таблица 67

**Эмиссия предельных углеводородов почвенным покровом планеты в атмосферу  
[Минько, 1988]**

Почва	Площадь, тыс. км <sup>2</sup> (% от общей пло- щади почвен- ного покрова)	Поток углеводородов за ПБА, 10 <sup>12</sup> г		
		CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Тундровая зона	6 866,0 (5,2)	3–6	1–3	0,2–0,4
Глеимерзлотные, болотно-мерзлотные, мерзлотно-таежные; кислые и слабокислые бореального, умеренно холодного климата; болотные и глеттаежные бореального климата	21 596,0 (16,4)	57–169	9–37	2–13
Нейтральные и слабощелочные суббореаль- ного теплоумеренного климата равнинных и горных территорий мира	6 607,7 (5,0)	22–31	11–20	4–7
Тропические и субтропические леса	25 000,0 (19,0)	–5	–0	–0
Саванны	23 000,0 (17,4)	–10	–0	–0
Возделываемые под культуру риса	1 400,0 (1,1)	31–55	27–47	3–4
Непродуктивные и малопродуктивные земли: арктические и песчаные пустыни, земли насе- ленных пунктов, промышленности, транспорта и нарушенные человеком	25 000,0 (18,2)	–0	–0	–0
Сумма	108 489,7 (82,3)	98–246	48–107	9,2–24,4

почв (луговые, часть горных почв, некоторые почвы бореального, суббореального и субтропического климата и т.д.), для полного охвата территории почвенного покрова Земли полученные итоговые величины допустимо умножить на коэффициент 1,2. В этом случае интегральный поток метана в атмосферу от почвенного покрова в атмосферу составит  $(118–295) \times 10^{12}$  г/год, этана –  $(58–128) \times 10^{12}$  г/год, и пропана –  $(11–29) \times 10^{12}$  г/год.

**Закись азота (N<sub>2</sub>O).** Состав и мощность источников закись азота изучены заметно хуже, чем у метана. Согласно традиционной точке зрения, N<sub>2</sub>O продуцируется главным образом микроорганизмами почв и водоемов, не имеет существенных тропосферных стоков и подвергается фотолитическому разложению только после попадания в стратосферу (табл. 64). В последнее время положение о ведущей роли биологических источников N<sub>2</sub>O оспаривается, ряд авторов основное значение отводит сжиганию биомассы и ископаемого топлива [Weiss, Graid, 1976].

Микробиологическими процессами, ответственными за образование N<sub>2</sub>O в почве, являются денитрификация и в меньшей степени – нитрификация. Их интенсивность существенно зависит от поступления в почву нитратных и аммонийных удобрений. Это дает основание рассматривать увеличивающееся использо-

вание азотных удобрений в качестве причины современного роста атмосферного содержания закиси азота, и как предпосылку сохранения этой тенденции в будущем [Взаимодействие почвенного и атмосферного воздуха, 1985].

Редукция нитратов и нитритов может протекать и вне прямого участия микроорганизмов, посредством взаимодействия  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{NO}_2^-$  с восстановленными неорганическими соединениями и некоторыми органическими компонентами почвы, но данные о масштабе этих процессов отсутствуют. Есть сведения о возможности окисления закиси азота почвами в аэробных условиях, но оценить значимость этого процесса в круговороте  $\text{N}_2\text{O}$  в настоящее время также не представляется возможным.

Таким образом, доля участия почвенного покрова в атмосферном бюджете закиси азота еще достоверно не оценена, что весьма затрудняет прогнозы относительно будущих изменений ее содержания в атмосфере.

**Оксись углерода (СО).** Принадлежит к числу важных газовых примесей атмосферы, радиационно малоактивна, но при этом играет заметную роль в фотохимических тропосферных реакциях (взаимодействует с гидроксильным радикалом, влияет на содержание озона и т.д.). Основным наземным источником является сжигание жидкого топлива и горение биомассы ( $(35-1600) \times 10^{12}$  г/год), атмосферным – окисление алканов гидроксильным радикалом. Сток окиси углерода из атмосферы обеспечивается главным образом фотохимическим окислением и за счет поглощения почвенным покровом ( $(1650-3550) \times 10^{12}$  г/год).

Таблица 68

Оценка мощностей источников и стоков ( $10^{12}$  г/год) малых газовых составляющих атмосферы [Минько, 1988]

Составляющие	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$	Составляющие	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$
Источник			Источник		
Почвенный покров	490–915 [118–295 (с.о)]	11–79	Автомобильный транспорт	0,5	4,7–6
Континентальная растительность	?	0,8–1,4	Фотохимические реакции в тропосфере	–	–
Мировой океан (биологические процессы)	14,3	3–70	Грозовые разряды	–	15–90
Пресные водоемы	51	5	Сумма	555–871	42–257
Домашние и дикие жвачные животные, человек	79	–	Почвенный покров от суммы источников, %	17–41	7–53
			Сток		
Насекомые	30	?	Почвенный покров	15	507*
Свалки твердых бытовых и промышленных отходов	30–70	?	Мировой океан	?	40–140
Лесные пожары, сжигание биомассы	25–110	2–6	Фотохимические реакции в тропосфере	860–2900	1–5
Геогенный	200	–	Сумма стоков	876–2921	91–195
Потери при добычи природного газа	7–21	–			

\*Примечание. Оценка дана для рисовых почв.

Наиболее важными агентами, ответственными за поглощение CO природными системами, являются карбоксидобактерии, с жизнедеятельностью которых связывают процесс потребления CO почвой из атмосферы [Роль микроорганизмов ..., 1979].

В качестве сколько-нибудь значительного источника CO почва как правило не рассматривается. Одна из причин – отсутствие данных об образовании в почвах окиси углерода. Исключение составляют некоторые почвы аридных районов, для которых обнаружена генерация CO, по всей видимости, абиогенного происхождения. Нижняя граница оценки эмиссии CO почвами приведены в табл. 68. Вероятно, с расширением работ по изучению газовой функции почвенного покрова следует ожидать заметного роста этой величины.

**Молекулярный водород (H<sub>2</sub>).** Радиационно малоактивен, но оказывает косвенное влияние на содержание парниковых газов, так как активно участвует в фотохимических реакциях тропосферы. По имеющимся данным, основное количество H<sub>2</sub> образуется в результате промышленных процессов и работы транспорта; более половины стока обеспечивается почвенным покровом, остальное – фотохимическим окислением в атмосфере (табл. 68).

В заключение можно отметить, что почва в той или иной степени регулирует содержание в атмосфере CO<sub>2</sub>, оксидов N, включая закись, CH<sub>4</sub> и гомологичные ему соединения.

Роль почвы в регулировании состава атмосферы очень важна потому, что уравнивает деятельность растений, поглощающих из атмосферы CO<sub>2</sub>. Почва восполняет эту убыль. Данные геологов свидетельствуют, что кислородная атмосфера Земли возникла до зеленых растений. Зеленые растения и почвы возникли одновременно, что способствует сохранению состава атмосферы в результате компенсирующей роли почвы.

#### Глава 4

### ЗНАЧЕНИЕ ПОЧВ В ЭВОЛЮЦИИ ЖИЗНИ И СОХРАНЕНИИ НА ЗЕМЛЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ

“...значение почв в истории планеты  
гораздо больше, чем это обычно  
кажется”

[В.И. Вернадский. Биосфера, 1926]

Вопрос о происхождении и эволюции жизни на Земле издавна занимал и продолжает занимать многих мыслящих людей. Может быть это одна из самых сложных и запутанных проблем естествознания. Ей посвящена огромная литература. Очень велико и разнообразие взглядов ученых по этой проблеме – от самых общих умозрительных представлений мыслителей античного времени до детально разработанных концепций современных ученых, использующих новейшие данные биологических, химических, геологических и астрономических наук.

Пожалуй, наиболее широко распространенной и подробнее других аргументированной является точка зрения, согласно которой жизнь возникла на Земле



в мелководных прибрежных водах первичного океана, где находилось большое количество органических соединений, способных образовывать комплексные коацерваты – зачатки жизни. Впрочем, не исключается и возможность внеземного происхождения жизни, о чем свидетельствуют находки в метеоритах органических соединений и фоссилизированных примитивных организмов. Об этом писал В.И. Вернадский.

Некоторые исследователи допускают возможность зарождения жизни на Земле не в морской среде, а на суше. Такую точку зрения высказал В.Р. Вильямс в своей работе “Развитие первичного почвообразовательного процесса” [1951]. По его мнению, в прозрачной воде океана жизнь не могла зародиться из-за проникающей в нее ультрафиолетовой радиации солнца. Защитного же озонового экрана в те далекие геологические времена еще не было, так как не было зеленых растений, продуцирующих кислород. Поэтому считал Вильямс, наилучшие условия для зарождения хемотрофных литофильных микроорганизмов были в “ультрафиолетовой тени” расщелин и каверн выветривания горных пород суши, где скапливалась атмосферная влага. По мере эволюции жизни вслед за хемотрофами появились эутрофные бактерии, водоросли, грибы, мхи, а затем и высшие зеленые растения, постепенно накапливающие в поверхностных горизонтах горных пород органические вещества и создававшие примитивные первичные почвы. За возникновение жизни на увлажненной суше, в верхней части слоя коры выветривания высказался в своей книге “Палеогеография” К.К. Марков [1960].

Возможно, стоит заметить, что по представлению некоторых современных исследователей для биосинтеза высокомолекулярных соединений и возникновения жизни благоприятны экстремальные физико-химические и гидротермические условия. Поэтому “условия для подобного синтеза существовали в большей степени на суше, чем в океане”.

“Скальную гипотезу” условий зарождения жизни высказал Б.Б. Польшов [1945; 1948]. Обобщая литературные материалы и результаты собственных наблюдений, он предложил следующую концепцию, которую считает возможным рассматривать в качестве некоей схемы общей эволюции жизни на начальных этапах ее зарождения и развития.

Первыми поселенцами на поверхности скал массивно кристаллических пород являются прототрофные (хемолиготрофные) бактерии – нитрификаторы, окисляющие аммиак в нитриты и нитраты, а также микроскопические сине-зеленые водоросли (цианобактерии), осуществляющие фотосинтез органических веществ с выделением в атмосферу кислорода. Они подготавливают основу для дальнейшего заселения и развития более разнообразной микрофлоры, включая низшие грибы, а затем лишайников и мхов. Все эти организмы в совокупности действуя на поверхность скал не только химически, но и физически, преобразуют поверхность породы в органоминеральный субстрат, пригодный для поселения высшей растительности и сопутствующей ей фауны, т.е. образуют примитивную, первоначальную почву. Так, постепенно расширялся набор и минеральных элементов включавшихся в биологический и геологический круговорот веществ.

Все это позволяет предполагать, пишет Б.Б. Польшов, что “... развитие жизни на нашей планете происходило по схеме, аналогичной той, по которой современная жизнь завоевывает магматические породы и готовит материал для более широкого распространения организмов”.

Подтверждение своей гипотезы Б.Б. Польшов видел в том, что в результате процессов выветривания и почвообразования на суше происходил геохимиче-

ский вынос многих химических элементов с поверхности суши в океан. В океане одновременно осуществлялся процесс приспособительной эволюции морской жизни, реагировавшей на изменение минерального состава водной среды обитания (преобладание кремниевых, карбонатных скелетов животных и другие глобальные явления).

О том, что жизнь первоначально зародилась не в океане, а на суше писал известный микробиолог Н.Г. Холодный. Исходя из микробиологических позиций, он пришел примерно в те же годы к заключению, что "...не вода, а поверхность первозданных горных пород, покрытая тонким слоем ила и граничащая непосредственно с атмосферой, была колыбелью жизни на земле и первым местом обитания наиболее стойких и способных к дальнейшему развитию архебионтов".

Наблюдениями М.А. Глазовской в нивальном поясе Центрального Тянь-Шаня было установлено, что пионерами заселения скальных поверхностей массивных изверженных пород являются сине-зеленые и диатомовые водоросли, особенно силикатные бактерии, близкие к роду *Meghatherium*, грибы из рода *Penicillium*. В менее суровых условиях поверхности скал заселяются не только микроорганизмами, но и разнообразной флорой литофильных лишайников и мхов.

Обстоятельное химическое и минералогическое изучение микрофлоры в первичном почвообразовании было выполнено в начале 1970-х гг. Н.Н. Сушкиной и И.Г. Цюрупой. В результате этого исследования было убедительно показано, что в образовании примитивных почв Арктики и высокогорного Памира пионерная роль принадлежит проактиномицетным лучистым грибкам (класс актиномицетов). В условиях резкого недостатка (или даже отсутствия) азотного, углеродного и минерального питания, эти микроорганизмы обнаруживают способность к гетеротрофной ассимиляции углекислоты из воздуха, фиксации атмосферного азота и растворению первичных минералов с переводом элементов минерального питания в доступную для растений форму.

По мнению Г.А. Заварзина и И.Н. Крылова, на самых ранних этапах докембрийской истории нашей планеты единственными ее обитателями были сине-зеленые водоросли (цианобактерии), продуцирующие кислород и в сообществе с ними разнообразные бактерии. С жизнедеятельностью сине-зеленых водорослей связано образование строматолитов – карбонатных слоистых образований в мелководьях, включающих остатки сине-зеленых водорослей. Образование строматолитов относят к самому древнему геологическому периоду истории Земли – к архею (2,5 – 3,5 млрд лет назад).

В настоящее время цианобактерии встречаются преимущественно в экстремально неблагоприятных условиях жизни – в горячих источниках вулканических областей и на поверхностях ледников, в максимально соленых водах и засоленных почвах, на поверхностях пустынных почв и горных пород в виде пленок и корочек. Таким образом, сине-зеленые водоросли выступают пионерами заселения мест с предельно крайними для жизни условиями. Многие из них вступают в ассоциацию с другими видами бактерий, а также грибами, образуя лишайники.

В наше время, в результате изучения самых древних следов появления и развития жизни на Земле, а также в результате исследований современных примитивных форм жизни, вряд ли можно однозначно утверждать, что жизнь могла появиться первоначально только в водной среде и лишь много позднее вышла на сушу. Вероятнее предполагать возможность одновременного возникновения микроскопических форм жизни как в океане, так и на земной суше, особенно в

тех ее экологических нишах, где обеспечивался непосредственный контакт трех природных сред обитания: твердой, жидкой и газообразной. В таких нишах и могли возникать тончайшие органо-минеральные пленки, т.е. примитивные почвы, в которых накапливался мелкозем, органическое вещество и биофильные элементы питания, закладывались основы великого биологического круговорота на земной суше.

Если начальные формы эволюции жизни в водной среде прослежены в настоящее время сравнительно полно, то аналогичных свидетельств о сухопутной жизни либо совсем нет, либо они крайне скудны и единичны. Известно, например, что наиболее древние ходы животных обнаружены в палеопочвах верхнего ордовика, следы жизнедеятельности беспозвоночных животных найдены в раннем силуре; первые наземные животные также найдены в раннем силуре, но может быть они обитали в водорослевых корках на поверхности почв в еще более ранние времена. Исследование адаптации аэробных животных к дыханию в почве привело к мысли о возможности заселения почв не из воды, а с поверхности суши.

Все же большинство ботаников, палеоботаников, палеогеографов и геологов утверждают, что в докембрии, кембрии и ордовике суша выглядела еще пустынной и растительного покрова на ней не было. Господствовали на поверхности суши бактериально-водорослевые пленки, грибы и лишайники. Однако биогеохимическая их деятельность была видимо очень активной, о чем можно судить по мощным древним континентальным корам выветривания. Некоторые исследователи рассматривают древние коры выветривания в качестве реликтов древних почв.

В силуре и начале девона (430–400 тыс. лет назад) на суше появились первые высшие растения. Они были представлены псилофитами (рионифитами) – сосудистыми бескорневыми и с зачаточной листвой растениями, обитавшими преимущественно в прибрежных морских мелководных лагунах и болотах. В девоне на Земле сильно расширилась площадь суши. Она начала заселяться плаунами, папоротниками, облиственными кустарниками и деревьями с развитой корневой системой.

На суше началось формирование “настоящих” почв, отложение органических веществ в виде залежей торфа и углей. В карбоне этот процесс усилился в связи с наступлением более влажного климата. В растительном мире появляются первые голосеменные – хвойные деревья, на сушу выходят многочисленные виды животного мира, в том числе насекомые, пауки, клещи и др. Вообще, конец палеозоя (карбон и пермь) ознаменовался широким завоеванием суши разными группами организмов растительного и животного мира. Это время господства на большей части суши тропического и субтропического влажного климата, время развития интенсивного почвообразовательного процесса и формирования мощных кор выветривания аллитного и ферраллитного типов. Этот тип ландшафтов преобладал почти до середины перми. По мнению многих исследователей, завоевание растительным и животным миром земной суши было переломным моментом в истории развития жизни на Земле. И в этом нельзя не видеть важной роли почвы как особой среды обитания.

По словам М.М. Камшилова [1974], выход растений и животных из водной среды на сушу открыл широкие перспективы для прогрессивной эволюции и “...эволюция жизни на суше пошла явно ускоренными темпами”. Н.М. Страхов [1971] писал: “завоевания континентов сопровождалось резким возрастанием общей биомассы живого вещества: она по крайней мере удваивается”. По его мнению, это был переломный момент в развитии жизни на Земле.

Таблица 69

	Континент	Океан
Зеленые растения	$2,4 \times 10^{12}$	$0,0002 \times 10^{12}$
Животные и микроорганизмы	$0,02 \times 10^{12}$	$0,003 \times 10^{12}$
Итого	$2,42 \times 10^{12}$	$0,0032 \times 10^{12}$

В настоящее же время установлено, что живое вещество океана в 700–1000 раз меньше живого вещества суши и, следовательно, “выход растений на сушу означал более значительное увеличение биомассы, чем это допускалось в расчетах В.А. Успенского и Н.М. Страхова”.

Б.С. Соколов и И.С. Барсков [1988] также относят заселение суши растениями и животными и появление “настоящих почв” (400 млн лет назад) к одному из глобальных этапов в развитии биосферы.

По данным Н.И. Базилевич с соавт. [1960] масса живого вещества на Земле в настоящее время распределяется следующим образом (в тоннах сухого вещества) (табл. 69).

Из этих данных видно, насколько плотнее оказалась заселена живыми организмами суша, на которой главной средой обитания живых существ является почвенный покров.

Почвенный покров Земли несравненно богаче океана как среды обитания не только по общей величине биомассы живущих в ней организмов, но и по их видовому разнообразию. По подсчетам М.М. Камшилова [1974] число видов сухопутных животных составляет 93% от общего числа видов, водных – только 7%. То же самое и для растений – 92% сухопутных и только 8% – водных. Как принято говорить в подобных случаях – факты говорят сами за себя!

Какие же качества почв обеспечивают благоприятность их как среды обитания жизни на Земле? Может быть особенно глубоко этот вопрос был разработан М.С. Гиляровым. В своей монографии М.С. Гиляров [1949] писал: “Анализ условий обитания животных в почве дает возможность раскрыть исключительное значение особенностей этих условий в эволюции животного мира, в процессе освоения суши исходно-водными организмами”.

Главную особенность почвы как среды обитания Гиляров видел в том, что в ней одновременно и в тесном контакте представлены твердая, жидкая и газовая фазы состояния субстрата. Эти фазы обеспечивают возможность воздушного дыхания при минимальной потере влаги, наличие в почве и минеральных и органических веществ, пригодных для жизни автотрофных и гетеротрофных организмов. На большом количестве примеров в книге показаны пути адаптации насекомых и других беспозвоночных к почвенным условиям, как в отношении их питания, так и дыхания, способов передвижения и т.п. Все это сопровождалось эволюцией морфофизиологических черт организмов, осваивавших экологические особенности почв как сухопутной среды обитания. Исследования Гилярова получили дальнейшее развитие в трудах его учеников и последователей. Б.Р. Стриганова [1996] установила, что освоение почвы как среды обитания обеспечило сухопутным беспозвоночным возможность прогрессивной эволюции, сопровождавшейся активной дивергенцией форм и развитием разнообразных алломорфных приспособлений к питанию, локомоции и ориентации в почве. Д.А. Криволуцкий [1994] изучил реакцию почвенной биоты на радиоактивное загрязнение почв и пришел к выводу, что при этом происходит (в за-

висимости от степени загрязнения) нарушение функционального и биологического разнообразия экосистем. Накопленный в этом плане материал будет полезен для создания системы биологического контроля за состоянием почв и окружающей человека среды. Не менее тесная связь растений и микроорганизмов с разнообразием экологических особенностей почв. Еще в 1938 г. основатель микроморфологии почв Вальтер Кубиена обратил внимание на исключительно гетерогенное строение почв как природных тел, характеризующихся исключительным разнообразием в них микроэкологических условий. Он писал, что при микроскопическом изучении строения почв обнаруживается, что это не смесь, не масса разнородных веществ, но “целый организованный микромир”.

О своеобразии почв как трехфазных природных систем, характеризующихся исключительным разнообразием экологических условий, говорят и микробиологи. Они подчеркивают, что каждая почва представляет для микроорганизмов не одну среду, а множество сред обитания, обеспечивающих богатство видового и функционального разнообразия почвенной микробиоты.

По-видимому, экологически благоприятные свойства “настоящих почв”, т.е. мелкоземистых и обогащенных органическим веществом, обусловили быстрое распространение и эволюцию жизни на поверхности земной суши, которые произошли в конце палеозоя. Вряд ли можно сомневаться в том, что дальнейшая эволюция сухопутной жизни в мезозое еще теснее была связана с развитием почвенного покрова. К сожалению, ископаемых почв того времени не сохранилось и об их особенностях мы можем лишь догадываться по остаткам кор выветривания и господствовавшей тогда растительности.

К самому последнему геологическому периоду мезозойской эры – меловому периоду, особенно к его середине и второй половине (100–65 млн лет назад), приурочены такие важные события в развитии природы как появление и широкое распространение лиственных лесов, степей и пустынь в умеренных широтах северного полушария и вообще довольно четкая дифференциация его на биоклиматические зоны. Не будет ошибочным предположить, что столь же существенные изменения происходили и в развитии почвенного покрова. Очевидно создавались необходимые условия для образования соответствующих почвенно-растительных зон с ферраллитными корами и почвами в тропическом поясе, подзолистыми почвами под хвойными лесами приполярных широт, дерново-подзолистыми и бурыми лесными почвами лиственных лесов, степных и пустынных почв типа черноземов и каштановых, различных видов засоленных почв. Конечно, все эти почвы, вероятно, не были идентичны современным. Они несли в своем составе, режимах и свойствах отражение особенностей того времени. Однако общая тенденция появления в почвенном покрове с конца мелового периода сходных черт с почвами более позднего геологического времени (третичного и четвертичного) намечается достаточно ясно.

Если в палеогене на обширных территориях Европы и Азии преобладали еще субтропические гумидные условия почвообразования и формировались каолиновые и красноцветные коры выветривания, то в первый период неогена (миоцен) начинается похолодание и аридизация; соответственно на севере расширяется зона хвойных лесов, а на юге – степных пространств. В связи с изменением биоклиматической обстановки в миоцене под хвойными лесами вероятно протекал подзолистый тип почвообразования и в продуктах гипергенеза накапливались вторичные гидрослюдистые минералы. В южных аридных ландшафтах под степной растительностью формировались почвы черноземного и каштанового типов с карбонатными конкрециями.

По мнению В.В. Добровольского “...миоцен, на протяжении которого совершается глубокое изменение условий выветривания и соответственно состава и строения коры выветривания – своеобразный естественно исторический рубеж между древними эпохами и новейшим этапом гипергенеза” [1983].

В конце неогена (плиоцен) рельеф, расположение климатических зон, характер растительного и животного мира, почвенного покрова были уже близки к современному, но началось похолодание, что свидетельствовало о начальных фазах великого четвертичного оледенения Северного полушария (1,7 млн лет назад).

Почвы плиоцена и главным образом четвертичного периода (антропоген) сравнительно хорошо сохранились в виде погребенных слоев в толщах лессовых и покровных отложений плейстоцена. Конечно, они подверглись определенным изменениям, но все же изучение их строения, состава и свойств дало очень много для суждения об особенностях природных условий, при которых они сформировались. Материалы этих исследований послужили основой развития новой специальной дисциплины – палеопочвоведения. Важное значение для становления этой науки имели труды К.Д. Глинки, В.И. Крокоса, М.Ф. Веклича, И.П. Герасимова и др.

Многочисленные исследования остатков растений и животных в ископаемых почвах плиоцена, плейстоцена и голоцена убедительно свидетельствуют о тесноте их взаимосвязей и сопряженности эволюции в соответствии с изменением климатических и других природных условий.

В современной биологии все более утверждается мысль о том, что история развития органического мира может успешно проследиваться путем анализа эволюции не только и не столько отдельных видов организмов, но обязательно эволюции сообществ или биогеосистем.

Неотъемлемым компонентом наземных экосистем является их почвенный покров. Поэтому изучение роли и значения почв в эволюции жизни на Земле представляет одну из важнейших задач не только палеопочвоведения, но и общей теории эволюции биосферы.

Кстати следует вспомнить, что о близости органического мира и почв с геохимической точки зрения писал А.Е. Ферсман в своей фундаментальной “Геохимии”. Рассматривая строение и химический состав геосфер, А.Е. Ферсман анализировал средние величины содержания в них химических элементов – так называемых кларков. Он пришел к следующему знаменательному выводу: “Мы должны признать, что средний состав живого вещества следует в меньшей степени кларкам атмосферы и гидросферы, а ближе всего и непосредственно следует кларкам почвенного покрова, который в сущности и предопределяет состав организмов” [1937].

Если вспомнить, что почва представляет основную среду обитания живых существ на суше, то вывод А.Е. Ферсмана представляется очень убедительным.

Анализируя закономерности распределения редких и рассеянных химических элементов в почвах, А.П. Виноградов пришел к заключению, что “геохимическое изучение основной среды жизни – почв продвигает нас вперед по пути более глубокого познания эволюции флор и фаун далекого прошлого ...”

К сожалению и до настоящего времени, еще совсем недостаточно данных о содержании многих химических элементов, особенно в почвах погребенных и древних корах выветривания. Только дальнейшие исследования в этом направлении позволят в будущем разработать концепцию о коэволюции почв органического мира. Стремление представить наиболее полную картину эволюции

почв в связи с развитием органического мира и геологической истории Земли от докембрия до наших дней мы находим в монографии В.А. Ковды и в недавно вышедшей очень интересной книге Л.О. Карпачевского. Изучение экологических и эволюционных связей между почвами, растениями и животными приобрело в наше время очень актуальное значение в связи с обостряющейся проблемой сохранения на Земле биологического разнообразия.

На состоявшейся в 1992 г. в Рио-де-Жанейро Конференции Организации Объединенных Наций по окружающей среде и развитию была принята специальная “Конвенция о биологическом разнообразии”. Впервые человечество в полной мере осознало свою ответственность за ежегодное исчезновение 10–15 тысяч разновидностей биологических организмов. Если этот разрушительный процесс не прекратить, то всего лишь за несколько десятилетий с лица планеты Земля может исчезнуть половина всего разнообразия биологических видов, созданного эволюцией за многие сотни млн лет. Учитывая это обстоятельство, Конвенция гласит, что “...сохранение биологического разнообразия является общей задачей всего человечества”.

Основным условием сохранения биологического разнообразия, указывается в Конвенции, является сохранение *in situ* экосистем и естественных мест обитания. При этом понятие экосистемы определяется в Конвенции как “...динамичный комплекс сообществ растений, животных и микроорганизмов, а также их неживой окружающей среды, взаимодействующих как единое функциональное тело”.

С точки зрения почвоведения очень важно подчеркнуть, что почва является основной средой обитания наземных организмов и входит в экосистемы как неотъемлемый их компонент, поэтому сохранение разнообразия почв должно быть одним из важнейших условий реализации концепции сохранения биоразнообразия.

Почвоведцами и биологами накоплены обширные материалы, доказывающие тесноту связей между разнообразием характерных для них биценозов, отдельных видов растений, животных и микроорганизмов. Более того, теснота этих связей лежит в основе главного теоретического принципа докучаевского генетического почвоведения – почва является результатом взаимодействия факторов почвообразования, среди которых незаменимая роль принадлежит растениям, животным и микроорганизмам. Следовательно, разнообразие почв на Земле в значительной мере определяется разнообразием живых существ, а разнообразие последних связано с разнообразием почв.

На основе этого принципа получили признание такие “пограничные” дисциплины как индикационная геоботаника, зоологическая диагностика почв, индикационная зоология, которые успешно используют установленные почвенно-биологические корреляции в научных и практических целях.

На 15-ом Международном конгрессе почвоведов в Мексике (1994 г.) был проведен специальный симпозиум “Почвы и биоразнообразие”. На нем было обосновано предложение о разработке специальной программы исследований почв как генератора и хранителя биологического разнообразия.

Многочисленные почвенно-экологические исследования показали многообразие и неразрывность взаимосвязей почв с разнообразием органического мира. Это относится к связям структурно-функциональным, эволюционно-историческим, биогеохимическим, экологическим, географическим. Все шире закономерности этих взаимосвязей используются в таких смежных естественных науках как палеонтология, палеогеография, палеоантропология, археология и др.

Издавна и широко использовались знания взаимосвязей продуктивности сельскохозяйственных культур и лесных пород с плодородием различных почв, с решением практических задач земледелия, растениеводства, лесоводства, мелиорации и рекультивации почв.

С точки зрения сохранения биологического разнообразия особый интерес представляет изучение древних и реликтовых почв. Некоторые из них находятся под угрозой полного исчезновения (эрозия, застройка и т.п.), а между тем в них находятся специфические для этих почв и прошлых исторических эпох организмы, либо их остатки.

Выше уже было отмечено, что не только по величине биомассы, но и по видовому разнообразию почва и почвенный покров как среда обитания занимает особое место в биосфере. Не случайно В.И. Вернадский называл почву с населяющей ее фауной и растительностью единой живой пленкой суши. Б.Б. Полынов писал о почвенном покрове Земли как “оболочке наибольшей плотности жизни”, а М.С. Гиляров и его последователь Д.А. Криволицкий рассматривают почву в качестве “неисчерпаемого источника живых культур, основного хранилища генетического разнообразия жизни на нашей планете, щита биосферы”. Таковы взгляды наших выдающихся ученых на роль и значение почв в биосфере.

Все это говорит о том, что невозможно сохранить биологическое разнообразие на планете Земля не сохранив разнообразие почв. Отсюда следует необходимость всемерной охраны почв от деградации и разрушения, издания закона и законодательных решений по охране почв, рационализации землепользования, укрепления научных и научно-производственных учреждений в области почвоведения, создания “Красных книг” редких и особо ценных почв, организации отделов почвоведения в биосферных и других заповедниках.



---

---

## ЧАСТЬ IV

---

---

# РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ПОЧВ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА

### ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая почву как экологическое звено между гетеротрофами и автотрофами, растениями, животными и микроорганизмами, можно оценить экологические функции почвы как глобальную адаптацию биосферы к земным условиям. В то же время деятельность человека сопровождается нарушением сложившихся отношений и редукцией ряда экологических функций. Одна из этих редуцированных функций – функция нейтрализации продуктов метаболизма животных и превращения их в питательные вещества для растений. Эта функция нарушается двумя группами антропогенных процессов: непосредственной деградацией почв в результате деятельности человека (эрозия, загрязнение, изъятие почвы из экосистемы) и отчуждением продукции агроэкосистем из агроценозов.

Эрозия в целом нормальный геологический процесс, приводящий к образованию новых площадей осадочных пород – этого фундамента для последующего почвообразования и формирования экосистем на данной территории. Ее роль в эволюции почв показали Дэвис, С.С. Неуструев, Р.С. Ильин, Б.Л. Личков. Но, когда деятельность человека существенно (на два–три порядка) ускоряет скорость эрозионных процессов, эрозия превращается в главный фактор деградации почв. Восстановление присущих почве экологических функций в этом случае требует специальных приемов восстановления профиля почв, в первую очередь, гумусового горизонта, который наиболее активно регулирует скорость нейтрализации отходов, поступающих в почву из “зоосферы”.

Отчуждение продукции из агроэкосистем усиливает дисбаланс между снабжением растений и переработкой отходов зоосферы. Этот дисбаланс усугубляется тем, что основное потребление в современном мире территориально разобщено с производством сельскохозяйственной продукции. Город вынужден увозить продукты питания не только из агроценоза, но даже из данной страны. При этом все отходы уже не поступают в почву, а образуют свалки вблизи городов, утилизация которых зависит уже от уровня развития культуры и промышленности страны.

В связи с этим удобрения, органические и минеральные, в какой-то степени компенсируют ослабление указанной экологической функции.

Как видно из сказанного, учение об экологических функциях помогает агрохимии, вступает с ней в союз для восстановления редуцированных экологических функций почв. А сама агрохимия становится важной теоретической частью общей экологии биосферы. С этой точки зрения необходимо рассматривать и мелиорацию почв, которая в принципе изменяет экологические свойства

почв, создавая совершенно другие условия их функционирования. Поскольку функция продуктивности почв наиболее важна для человека при сельскохозяйственном производстве, то агрохимия и мелиорация пытаются наиболее рационально решить эту проблему. Но, так как при этом происходит потеря биологического разнообразия в биосфере, то создание условий для сохранения и восстановления этого биоразнообразия – это вторая сторона производственной деятельности человека, которая до последнего времени, к сожалению, далеко не соответствовала масштабам сельскохозяйственной деятельности. Именно эта задача, восстановить условия для сохранения биоразнообразия биосферы, стоит сейчас перед нами. И учет разнообразия почв, структуры почвенного покрова, сохранение естественных почв – не менее важная задача, чем производство сельскохозяйственной продукции.

## *Глава 1*

### **ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВЫ КАК ВАЖНЕЙШИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА**

Обеспечение постоянно растущего населения планеты высококачественными продуктами питания – важнейшая задача современного и будущего земледелия. Решить ее возможно при постоянной заботе о плодородии почвы. В условиях высоких темпов индустриального развития многих стран, нарастание техногенного пресса на почвенный покров вызывает необходимость решения не менее важной задачи сохранения почвы в экологически безопасном состоянии, с учетом воспроизводства утраченного ею плодородия при сельскохозяйственном использовании с целью получения сбалансированной по питательной ценности и химическому составу пищи для человека.

В естественных условиях на целинных, нетронутых человеком землях складывается сообщество растений, животных и биоты самой почвы, которое в равновесии с климатом оптимально использует условия природной среды. В таких биоценозах создаются почти замкнутые циклы биогенных элементов, которые повторно поступают в почву после отмирания живых существ данного сообщества, при максимально возможном биоразнообразии растительных и животных организмов в экосистеме.

Вмешательство человека в процесс земледелия приводит к замене биоценозов агроценозами, плодосменом культурных растений. Круговорот веществ нарушается, так как часть растительной продукции отчуждается с урожаем, с ним удаляются минеральные вещества, а также органические соединения, синтезированные с помощью солнечной энергии. Изменяется и животный мир таких экосистем. Разрыв циклов биогенных элементов приводит к изменению структуры комплексов микроорганизмов самой почвы. С изменением условий существования живых организмов в агроценозах одни из них отмирают, другие размножаются в ограниченных размерах. Снижение устойчивости агроэкосистем приводит к ограничению видового состава живых существ, к обеднению биоразнообразия. Неизбежным исходом такой трансформации природных угодий является снижение естественного плодородия почвы.

Реализация же потенциальной продуктивности культурных растений, заложенной в их генетике, требует обеспечения оптимальных условий питания био-

генными элементами, что возможно только на высокоплодородных почвах, где отмечается наличие всех факторов роста и развития растений в соответствии с биологическими требованиями культурных растений.

Следовательно, с самых первых шагов древнего земледелия возникла необходимость поиска путей восстановления утраченного плодородия почв, более разумного землевладения. И хотя современное цивилизованное общество располагает большим арсеналом средств повышения продуктивности земледелия, многие методы улучшения почв применялись тысячи лет назад.

По литературным источникам известно, что еще в земледелии Древнего Рима использовались органические удобрения, зола, гипс, известкование и мергелевание почв, высевались бобовые культуры. В Древнем Риме высоко ценили птичий помет как эффективное удобрение. В качестве зеленого удобрения применяли люпин, особенно на склонах Везувия. Позже стало известно, что почвы этих склонов обеспечены фосфором и калием.

В Древнем Риме земледелие считалось почетным занятием. Много оригинальных идей и наставлений, относящихся к повышению плодородия почв и ведению земледелия оставили древнеримские писатели Катон, Варрон, Колумелла, Плиний, которые занимались земледелием, ибо эта деятельность здесь считалась самой полезной и достойной свободного гражданина.

Выдающийся исследователь растительного мира Древней Греции Теофраст в своем сочинении "Исследования о растениях", написанном более 2300 лет тому назад, отмечал, на каких почвах, какие лучше культуры высевать, как поддерживать плодородие почвы, о роли навоза и т.д. Философы Древней Греции проявляли большой интерес к жизни зеленого растения. Они считали, что для его жизни необходимы вода, воздух, земля и огонь. И это близко к истине. Солнце как большой огонь обеспечивает растение теплом и светом, земля источниками минеральных веществ, воздух – углекислотой для фотосинтеза, а масса живого растения на 3/4 состоит из воды.

Следовательно, интерес к жизни растений и плодородию почвы у человека проявлялся на заре земледельческой деятельности. Затем история отмечает застой в развитии всех наук практически до эпохи Возрождения.

В России в XIV–XVI вв. повышается интерес к земледелию. С созданием методов химических и биологических исследований, с введением зерно-паровых трехпольных севооборотов, с распространением практики удобрения навозом появился интерес к представлениям в области ботаники и химии. В этот период (1563 г.) французский естествоиспытатель Б. Паллисси высказал взгляд на почву как на источник минеральных веществ, необходимых для растений. Его представления о причинах истощения почвы, о необходимости возврата зольных веществ в виде удобрений были доказаны точными опытами лишь спустя 300 лет.

Гипотезу о том, что главным фактором урожайности является селитра, а удобрительное действие навоза связано с ее образованием, предложил И.Р. Глаубер в 1656 г.

Теорию истощения почв, довольно близкую либиховской, в 1789 г. создал Рюккерт. Еще тогда он указывал, что истощение почв можно устранить с помощью удобрений.

Практически же в XVIII в. не сформировались определенные знания о роли солей в питании растений и роли почвы как их источника. И только в рукописи французского ученого Лавуазье, опубликованной после его трагической смерти в 1794 г., имеются записи, свидетельствующие, что основные положения минеральной теории питания были сформулированы раньше Либиха на 50 лет.

В России заметный прогресс в естествознании отмечается с публикацией оригинальных работ М.В. Ломоносова, который по праву является родоначальником естествознания в нашей стране. Если теория корневого питания растений в XVIII в. еще не была сформирована, то благодаря работам М.В. Ломоносова была вполне доказана роль атмосферы как источника углерода для растений. Гениальные его мысли о воздушном питании растений были опубликованы в работе “Слово о явлениях воздушных” (1753 г.), в которой отмечалось: “Преизобильное ращение тучных дерев, которые на бесплодном песку корень свой утвердили, ясно изъявляет, что жирными листьями жирный тук из воздуха впитывают”.

Эти положения впоследствии были подтверждены работами Пристли (1775 г.), Ингенгуза (1779 г.), Сенебье (1782 г.).

Однако потребовалось длительное время для раскрытия механизма этого процесса и разработки теории воздушного питания растений.

Более сложным путем развивалась теория корневого питания растений и значения удобрений для повышения плодородия почв. Периодом становления русской агрономической науки можно считать вторую половину XVIII в., благодаря работам А.Т. Болотова, И.М. Комова, А. Пошмана, М.И. Афонина и др. Они много внимания уделяли повышению плодородия почв путем использования навоза, золы, извести. Так, А.Т. Болотов уже в то время видел, что черноземы выпахиваются и нуждаются в удобрениях. В работе “О навозных солях” он писал об образовании из органических удобрений доступных для растений питательных веществ. Научные основы земледелия в России впервые были изложены в 1789 г. И.М. Комовым в книге “О земледелии”. Он подробно описывал свойства почв, давал указания как по морфологическим и геоботаническим признакам определить плодородие почвы; о химическом и механическом анализе почв; об определении в почве содержания глины, песка, извести и гумуса. “Узнавши таким образом свойства земли главное земледельца дело состоит в том, чтобы худую землю удобрить и, удобрив, стараться, чтобы доброты не теряла”. М.И. Афонин был первым русским профессором, который еще в 1770 г. в Московском университете начал преподавать агрономию.

Таким образом, в России к XIX в. сложились принципиально правильные агрономические знания о регулировании плодородия почвы, об удобрении растений, о роли органических удобрений и минеральных веществ в отечественном земледелии. В этот период, несмотря на уже опубликованные научные положения Паллисси, Глаубера и др. о роли минеральных солей в питании растений, шведский химик Валериус в 1761 г. высказал положение о питании растений гумусом. Наиболее активно и широко эту неверную гумусовую теорию питания растений распространял крупнейший немецкий агроном А. Тэер. Поскольку Тэер пользовался большой популярностью и авторитетом в то время, его ошибочные взгляды по гумусовой теории питания растений получили широкое распространение.

В этот период выдающимся деятелем русской агрономической школы был профессор Московского университета М.Г. Павлов. Он находился в командировке за границей и изучал агрономию у Тэера, и впоследствии придерживался его взглядов на питание растений и применение удобрений. Павлов очень много сделал для развития отечественной агрономии. Он был первым в России организатором опытного дела, издал книгу в 1828 г. “Земледельческая химия”. Павлов ничего не писал о роли азота, фосфора, калия и вообще о минеральном питании растений. Такие взгляды не могли дать объяснение действию удобре-

ний. Более успешной была его общественная, опытная и педагогическая деятельность.

Предшественник Ю. Либиха немецкий ученый Шпренгель опубликовал книгу “Учение об удобрениях”, в которой изложил свои научные позиции, близко совпадающие с теорией минерального питания Либиха.

Выход в 1840 г. книги Ю. Либиха “Химия в приложении к земледелию и физиологии” произвела коренной переворот в развитии агрохимии, теории минерального питания растений, в учении об истощении почв, о возврате в почву отчужденных с урожаем питательных веществ. Он впервые четко высказал идею о сознательном регулировании обмена веществ между человеком и природой.

Широта и глубина взглядов Ю. Либиха на питание растений и сейчас заставляют удивляться. Он писал: “...всякая почва лишь в том случае может считаться вполне плодородной для того или иного вида растений, скажем, для пшеницы, если каждая из частиц ее, соприкасающаяся с корнями, содержит все необходимые питательные вещества и при том в такой форме, которая позволяет корням усваивать эти вещества на любом этапе развития растения, в должное время и в надлежащем их взаимном соотношении”.

Книга Ю. Либиха произвела огромное впечатление на ученых и практиков и имела большой успех.

Трудно переоценить роль современника Ю. Либиха, Ж.Б. Буссенго, в изучении вопроса об источниках азота для питания растений. Ряд его важных работ по изучению круговорота веществ в земледелии явился фундаментом для создания новой отрасли науки – агрохимии. Синтез либиховского положения о роли зольных элементов и тезис Буссенго о значении азота в удобрениях сыграли большую роль в дальнейшем развитии теории корневого питания растений.

Опубликованием работы Гельригеля в 1886 г. об усвоении азота бобовыми культурами и их азотфиксирующей способности, благодаря наличию клубеньковых бактерий на корнях растений, завершается важный этап развития знаний о питании растений, составляющий основу теоретических положений современной науки.

Следовательно, исследование по формированию теории питания растений и воспроизводства плодородия почвы рассматривались как единая проблема.

Поддержание круговорота веществ в системе почва-растение, повышение продуктивности земледелия с целью обеспечения высококачественными продуктами питания постоянно растущего населения планеты, достижения в развитии теории минерального питания растений подвели науку к большому скачку в регулировании плодородия почвы – синтезу искусственных удобрений.

Создание минеральных удобрений особенно помогло нам поднять продуктивность почв намного выше той, которая возможна при установившемся биоценозе, отмечает английский агрохимик Д. Кук. И далее “...Философское значение этого громадного продвижения человечества до сих пор едва ли осознано в почвоведении”. “Точно так же не осознано должным образом многими политиками и экономистами или даже некоторыми земледельцами и их советниками в “развитых” странах”.

После того как Ю. Либих рекомендовал получать растворимые однокальциевые фосфаты путем обработки серной кислотой кости, а Лооз в Англии в 1843 г. по такой же технологии предложил обрабатывать фосфориты, стала интенсивно развиваться суперфосфатная промышленность.

Крупный вклад в решение фундаментальных и прикладных задач агрохимии, в изучение отдельных видов минеральных удобрений и химических мелиорантов почвы во второй половине XIX в. внесли Д.И. Менделеев, А.Н. Энгель-

Таблица 70

**Применение минеральных удобрений в индустриально развитых странах (млн т)  
ФАОстат за 1995 г.**

Страна	Азот- ные, N	Фосфор- ные, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Калий- ные, K <sub>2</sub> O	Всего	Страна	Азот- ные, N	Фосфор- ные, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Калий- ные, K <sub>2</sub> O	Всего
США	11,11	4,09	4,91	20,11	Франция	2,39	1,03	1,49	4,91
Канада	1,51	0,62	0,31	2,44	Италия	0,92	0,55	0,42	1,89
Велико- британия	1,39	0,38	0,49	2,26	Япония	0,53	0,63	0,48	1,64
					Китай	23,60	8,82	3,10	35,52

гардт, А.Е. Зайкевич, П.А. Костычев. В конце XIX в. и начале XX в. в России начались активные исследования по агрохимии К.А. Тимирязева, П.С. Коссовича, К.К. Гедройца, Д.Н. Прянишникова, а затем многочисленных их учеников и последователей.

В современном высокопродуктивном земледелии минеральные удобрения стали стержневым фактором, обеспечивающим постоянно растущее население высококачественными продуктами питания. Сейчас каждому профессионально подготовленному земледельцу ясно, что получать высокие и устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур, базируясь только на эксплуатации естественного плодородия почв, нельзя. Это непременно приведет к прогрессирующему падению урожаев.

Не случайно уже в 1960-е гг. минеральные удобрения, применяемые в Европе, Северной и Центральной Америке, составляли 75% их мировой продукции. Причем всякая попытка недооценки минеральных удобрений, ссылаясь на отсутствие средств, слабую экономику хозяйства и т.д., ничем не оправдана, а с точки зрения стратегии земледелия – ошибочна. Известно, что удобрения снижают затраты на единицу продукции в научно-обоснованных технологиях, повышают не только агрономическую, но и экономико-энергетическую их эффективность. Это подтверждается опытом индустриально развитых стран, где центральное место в интенсивных системах земледелия занимают минеральные удобрения, выполняющие многосторонние функции, кроме обеспечения высоких урожаев. Д. Кук пишет: “высокоразвитые и капитализированные системы земледелия должны обеспечивать максимальные урожаи, потому что только при этом могут оправдаться большие затраты на землю, рабочую силу и машины при снижении себестоимости продукции”.

Этим можно объяснить высокий уровень применения, например, минеральных удобрений в странах с интенсивным земледелием (табл. 70).

Постепенный переход на более прогрессивные системы земледелия и нарастание темпов применения минеральных удобрений повышают производство продукции растениеводства, что можно представить на примере динамики роста урожаев пшеницы в странах Западной Европы за 200 лет (рис. 29).

Для сравнения приводим динамику роста объемов работ по повышению плодородия почв России (ж-л Химия в с/х 1994, № 3). Если до 1988 г. применение минеральных и органических удобрений нарастало высокими темпами, то в последующие годы стало резко снижаться (табл. 71). Это привело к снижению плодородия пахотных земель России, что подтверждает баланс питательных веществ в системе почва-растение (табл. 72).

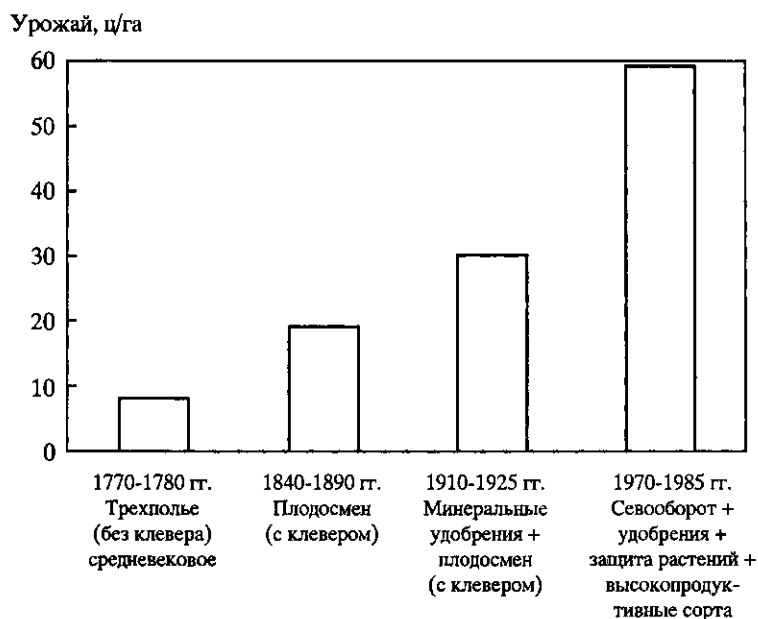


Рис. 29. Динамика роста урожаев пшеницы в Западной Европе за 200 лет

В последующие годы продолжался процесс резкого снижения внесения минеральных удобрений. Из предусмотренных планом 1995 г. 16,5 млн т, в действующем веществе внесено только 1,5 млн т (9,1%), а органических – 112 млн т (или 18,4%) от необходимого количества. Следовательно, поставки минеральных удобрений земледелию страны против их потребности в 1995 г. снизились более, чем в 10 раз. В результате в системе почва-растение сложился отрицательный баланс – 97 т/га [Государственный (национальный) доклад “О состоянии и использовании земель Российской Федерации за 1995 г.” М. 1996 г. С. 38–39]. При сохранении тенденции уменьшения применения минеральных удобрений свойства почвы и в дальнейшем будут ухудшаться, что может привести к необратимым последствиям деградации наиболее ценных в стране пахотных земель. Об этом можно судить по показателям, характеризующим плодородие почв. Так, 23,5% почв пашни имело низкое содержание доступных форм фосфора, 9,2% – обменного калия, более 80% обследованных пахотных земель характеризовались низким и средним содержанием таких биогенных элементов как кобальт, молибден и цинк, 42,8% – низким содержанием гумуса, а в Нечернозем-

Таблица 71

Динамика объема работ по повышению плодородия почв России по годам

Объем работ	1965	1975	1985	1988	1990	1992	1994
Поставка минеральных удобрений, млн т д.в.	2,6	7,9	12,7	13,3	11,7	5,5	3,0
Внесение органических удобрений, млн т д.в.	167	330	458	494	433	269	22
Известкование, млн га	1,4	3,2	4,9	5,9	4,7	3,8	3
Фосфоритование, млн га	–	–	1,8	2	2	1,5	1
Гипсование, тыс. га	20	46	98	200	159	100	34

Таблица 72

## Баланс питательных веществ на Российской пашне, кг/га [Постников, Кондратенко, 1994]

Статья баланса	1986– 1990 гг.	1991 г.	1992 г.	1993 г.	1994 г. (ожидаемый)
Внесено под урожай	147	110	92	58	40
Из них с минеральными удобрениями,	100	78	65	34	22
с органическими удобрениями	47	32	27	24	18
Вывос всего	138	123	135	139	130
В том числе с урожаем,	113	90	110	106	90
с сорняками	25	33	25	33	40
Баланс + –	+9	–13	–43	–81	–90

ной зоне – 44,8%. На большей части территории Российской Федерации баланс гумуса отрицательный.

Снижение темпов химической мелиорации пахотных земель ухудшило и другие показатели плодородия почв. Так, на 1 января 1995 г. площади кислых почв составляли в Нечерноземной зоне – 54,8%. А в таких сельскохозяйственных районах как Центральный – 52,8, Волго-Вятский – 62,2, Дальневосточный – 72,5%. Растут площади и кислых черноземных почв.

Как следствие совершенно недостаточного и некачественного внесения извести, а в ряде случаев и систематического внесения физиологически кислых минеральных удобрений и выпадения кислотных осадков вблизи крупных промышленных центров, происходит постоянное подкисление почв. Возросли площади кислых почв в Центрально-Черноземном, Поволжском, Северо-Кавказском, Западно-Сибирском и Восточно-Сибирском районах.

История свидетельствует, что с падением плодородия земель государства попадают в экономическую зависимость более развитых стран, снижается продовольственная безопасность, а некоторые страны в прошлом в связи с этим исчезали с географической карты мира, ибо, как отмечает американский эколог Б. Небел “...на истощенных землях живут нищие или они совсем безлюдны”.

Конечно же, познание сущности явлений и процессов земледелия, как и в других сферах человеческой деятельности, вечно и бесконечно, ибо наши знания находятся в постоянном динамическом углублении, а это требует совершенствования приемов и технологий при их реализации на практике. В свою очередь развивается и методология агрохимических исследований: повышается значение системного подхода, моделирования, прогнозирования, усиливается связь агрохимии с другими фундаментальными и прикладными отраслями наук, особенно при решении общих глобальных проблем биосферы.

На каждом историческом этапе развития науки возрастает приоритетность тех или иных направлений исследований при общей стратегической задаче земледелия – это сохранение и приумножение плодородия почвенного покрова, его экологической чистоты – как главного богатства любого государства, материальной основы существования человечества.

Можно сказать, что важнейшее звено биосферы – высокоплодородный почвенный покров – является базисом цивилизованной жизни человека на нашей планете, адекватно отражает здоровье любой нации. Поэтому интенсивная эксплуатация почвы до полного истощения естественного плодородия без принятия мер по его восстановлению является медленным экологическим самоубийством. Без почвенного покрова с его экологическими функциями не может



быть жизни на земле. И до тех пор, пока просвещенным человечеством не будет признано, что почва – это центральное звено окружающей его природной среды, постоянные неудачи нас будут преследовать не только в земледелии, но и в других областях человеческой деятельности.

В нашей стране практически исчерпаны пахотнопригодные земли. На 1 января 1996 г. из 221,95 га сельхозгодий пахотные земли составляли 130,2 млн, а запасные земли для использования в пашне определены всего лишь в 1,95 млн га. Поэтому сейчас важнейшая задача состоит в рациональном и разумном использовании существующей пашни, ее охране и защите от различных источников техногенного загрязнения.

В решении комплекса вопросов по оптимизации свойств и плодородия почвы важную роль выполняют агрохимические средства – удобрения и химические мелиоранты. Альтернативы им нет. В классическом смысле агрохимические средства оказывают многостороннее воздействие на почву: пополняют запасы биогенных элементов для растений, усиливают мобилизацию питательных веществ в почве, повышают энергию жизненных процессов в ней и изменяют свойства самой почвы.

Поэтому в земледелии цивилизованных стран мира признано, что в доле прироста продукции растениеводства они составляют 40–50%. Удобрения и химические мелиоранты выполняют важные экологические функции в современном земледелии, а также являются наиболее эффективными средствами регулирования плодородия почвы.

## *Глава 2*

### **ГЛОБАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР УГРОЗЫ СОВРЕМЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА**

Большое значение плодородия почв не только в жизни человека, но и в устойчивом функционировании земной биосферы казалось бы предопределяет необходимость самого бережного отношения к сохранению почв и разумному использованию почвенных ресурсов. В действительности же почти вся история человечества характеризуется стихийным и бесконтрольным их использованием, приводившим в целом ряды регионов Земли к разрушению почвенного покрова.

Еще в середине XIX в. выдающийся немецкий ученый – один из основателей агрохимии – Ю. Либих [1936] высказал мысль о том, что причина гибели некоторых исторических цивилизаций кроется в непомерном истощении и разрушении почв.

По современным данным [А.Б. и Б.Г. Розановы, 1990] человечество уже утратило за исторический период около двух млрд га некогда плодородных почв, превратив их в антропогенные пустыни и так называемые бедленды (дурные земли). Это больше, чем площадь всей современной пашни в мире (1,5 млрд га). И все же, в XIX в. процесс разрушения и деградации почв имел хотя и очень большие размеры, но не носил еще глобального характера. В конце XX в. стало ясным, что деградация почв приобрела глобальные размеры и является одной из самых главных угроз глобального экологического кризиса [Добровольский, 1997].

Процессы антропогенной деградации почв очень разнообразны: это физическое разрушение почв водной и ветровой эрозией, засоление и осолонцевание, оглеение (застойное переувлажнение), переуплотнение, дегумификация и деструктуризация, повышение кислотности или щелочности, истощение элементами питания растений, угнетение почвенной биоты вследствие переуплотнения, химического и радиоактивного загрязнения.

В 1991 г. Международный справочно-информационный почвенный центр в Нидерландах совместно с ЮНЕП разработали мировую карту состояния антропогенной деградации почв, подтвердившую глобальный размах этого явления [World Map..., 1990–1991]. Из нее видно, что разной степени деградации почв в настоящее время подвергаются почти два млрд гектаров почв, из них 55,6% за счет водной эрозии, 27,9% – ветровой эрозии (дефляции), 12,1% – химических факторов (засоление, загрязнение, истощение элементами питания), 4,2% – физического уплотнения, подтопления.

Уместно вспомнить, что все пахотнопригодные земли в мире занимают в настоящее время площадь около трех млрд га. При этом ежегодно из сельскохозяйственного использования выбывает около 8 млн га. в результате отчуждения на другие хозяйственные нужды и около 7 млн га из-за различных процессов деградации почв (эрозия, опустынивание, засоление, загрязнение). Таким образом, каждый год человечество теряет около 15 млн га продуктивных угодий [Романова, Куракова, 1993]. При этом процесс деградации почв идет с возрастающей скоростью. За последние 50 лет она возросла в 30 раз по сравнению со среднеисторической в течение голоцена [Розанов и др., 1989].

На территории Российской Федерации состояние почвенного покрова неудовлетворительное, а в ряде районов – критическое. Из 222 млн га сельхозугодий России – 117 млн – эродированные и эрозионноопасные земли, в том числе на пашне – около 85 млн га (из 130 млн га всей площади пашни), 40 млн га представлены засоленными почвами и солонцовыми комплексами, 26 млн га неувлажнены и заболочены, 73 млн га почв являются кислыми, 12 млн га засорены камнями, 7 млн га заросли кустарниками и мелколесьем, около 5 млн га загрязнены радионуклидами, на больших площадях пашни почвы переуплотнены, во многих южных регионах России прогрессирует опустынивание (Калмыкия, Астраханская область) (табл. 73). За последние 20 лет площадь деградированных почв увеличилась в 1,6 раза [Государственные (национальные) доклады, 1995–1996].

В Государственном докладе Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ за 1995 г. говорится, что в большинстве основных сельскохозяйственных регионов России распаханность территории превышает экологически допустимые пределы. Она усиливает процессы деградации почв, снижает способность природных комплексов к саморегуляции и продуктивность сельскохозяйственных угодий [Государственный доклад Министерства охраны окружающей среды, 1996] (табл. 74).

Насколько же опасна в глобальном плане деградация почв для человечества? Чтобы ответить на этот вопрос достаточно казалось бы вспомнить, что 98–99% продуктов питания (по весу) и в том числе 87% белкового питания люди получают в результате использования почв в земледелии и животноводстве [Дювиньо, Танг, 1968; Моисеев, Крапивин и др., 1979]. Следовательно, продовольственное благополучие человечества даже на современном уровне напрямую зависит от сохранения плодородия почв на большей части сельскохозяйственных угодий. А между тем экологическое значение почвенного по-

Таблица 73

## Площадь и степень деградации почв [Global Assessment of Soil degradation, 1991]

ДЕГРАДАЦИЯ		ПЛОЩАДЬ		
		млн га	%	
Тип	Смыв и разрушение водной эрозией	1093,7	55,6	
	Размывание и разрушение ветровой эрозией	548,3	27,9	
	Химическая деградация (обеднение элементами питания, засоление, загрязнение, закисление)	239,1	12,2	
	Физическая деградация (переуплотнение, заболачивание, просадки)	83,6	4,2	
	ВСЕГО:	1964,4	100	
	Степень	Слабая	749,0	38,1
		Умеренная	910,5	46,4
Сильная		295,7	15,1	
Очень сильная		9,3	0,5	

Таблица 74

## Причины деградации почв [Global Assessment of Soil degradation, 1991]

Континент	Причина деградации				
	Сведение лесов	Перевыпас	Неправильная агрокультура	Переэксплуатация	Промышленное воздействие
	Площадь, млн га				
Африка	67	243	121	63	+
Азия	298	1997	204	46	1
Южная Америка	110	68	64	12	-
Северная и Центральная Америка	18	38	91	11	+
Европа	84	50	64	1	21
Австралия	12	83	8	-	21
ВСЕГО	579	679	552	133	23

кровя мира далеко не ограничивается его сельскохозяйственной ценностью. Как это показано в предыдущих главах книги – оно значительно больше и шире, при том не только для человека, но и вообще для всего живого на земной суше. Несмотря на значительно меньшую площадь суши по сравнению с поверхностью мирового океана, тончайшая почвенная оболочка суши обеспечивает почти вдвое большую первичную биологическую продуктивность, а биомасса суши составляет 99,8% всей биомассы Земли [Моисеев и др., 1979; Базилевич, Родин, 1970]. Несравненно выше и видовое разнообразие жизни на суше, нежели в океане.

Анализ экосистемных и биосферных функций почв показывает их исключительно важную роль в биосфере и жизни человека. Еще в начале нашего века В.И. Вернадский писал, что "...все яснее становится нам значение почвы в биосфере – не только как субстрата, на котором живет растительный и животный мир, но и как область биосферы, где наиболее интенсивно идут разнообразные химические реакции, связанные с живым веществом [Вернадский, 1913].

Еще более ясными стали наши представления о важной и незаменимой роли почвы в биосфере и жизни человека во второй половине XX в. К этому заключению пришли многие выдающиеся естествоиспытатели нашего времени: биологи М.С. Гиляров, В.Н. Сукачев, Н.В. Тимофеев-Ресовский, геологи – А.П. Виноградов, Б.Л. Личков, А.Л. Яншин, почвоведы – И.П. Герасимов, В.А. Ковда, экологи – Ж. Дорст, П. Дювиньо, Н.Н. Моисеев, Ю. Одум, С.С. Шварц.

Как же сейчас обстоит дело с охраной и использованием почв – этой незаменимой основы жизни на земной суше?

В связи с быстрым ростом населения, развитием промышленности, строительством городов и транспортных магистралей, все увеличивается отчуждение из сельскохозяйственного использования плодородных почв. Все возрастает скорость их антропогенной деградации. Эти обстоятельства заставляют многие страны расширять распашку земель за счет сокращения площади лесов, лугов и пастбищ. Между тем, резервных, пахотнопригодных земель совсем не много. В мире они составляют всего 22% (табл. 75) территории земной суши, т.е. около 3,2 млрд га. Из них под пашней в настоящее время находится 1,5 млрд га. Остающиеся неосвоенные под пашню земли в количестве 1,7 млрд га представлены преимущественно почвами малоплодородными и трудноосваиваемыми [А.Б. и Б.Г. Розановы, 1990]. К тому же надо иметь в виду, что по мнению ряда исследователей, особенно тщательно анализирующих земельный фонд мира с экологических природоохранных позиций, общая площадь земель, которая может использоваться под пашню не должна превышать 2,7 млрд га. Тогда резерв пахотнопригодных земель уменьшается до 1,2 млрд га [Розов, Мельников и др., 1978]. Этот резерв пахотнопригодных земель находится главным образом в странах тропического пояса и представлен преимущественно красноцветными кислыми и выщелоченными ферраллитными почвами под влажно-лиственными лесами, а также и в разной степени солонцеватыми почвами тропических и субтропических саванн (табл. 76).

В России после распашки целинных земель уже не осталось резерва плодородных легко осваиваемых почв. Итак, главный вывод, который можно сделать о состоянии почвенных ресурсов мира, заключается в том, что резервный фонд почв для дальнейшего расширения земледелия очень ограничен, а по качеству почв существенно ниже уже используемого. Дальнейшее увеличение продуктивности сельского хозяйства в мире может идти не за счет новой распашки земель, а за счет повышения плодородия уже используемых в земледелии и животноводстве почв, притом со все более строгим соблюдением принципов почвоохранного экологически обоснованного земледользования.

В какой же мере человечество осознало опасность деградации почв и все увеличивающегося отчуждения земель из сельскохозяйственного использования?

Первая Всемирная конференция ООН по окружающей среде в Стокгольме в 1972 г. обратила серьезное внимание на состояние почвенного покрова планеты и приняла соответствующие рекомендации.

10-й Международный конгресс почвоведов, состоявшийся в 1974 г. в Москве, специально рассмотрев вопрос о роли почв в биосфере, подчеркнул важность проблемы потерь и деградации почв и наметил программу научных исследований в этой области.

В 1977 г. в Найроби состоялась Всемирная конференция ООН по опустыниванию, которая констатировала, что опустынивание всегда сопровождается деградацией почв в разных ее видах. Конференция разработала “План действий

**Площадь разных по экологическим свойствам земель планеты**  
**[А.Б. и Б.Г. Розановы, 1990]**

Характер почвы	Площадь земель		Характер почвы	Площадь земель	
	млн га	% от общей площади суши		млн га	% от общей площади суши
Ледниковые покровы	1440	10	ИТОГО, непригодные земли	11622	78
Очень холодные земли	2235	15	Малопродуктивные почвы	1937	13
Очень сухие земли	2533	17	Умереннопродуктивные почвы	894	6
Очень крутые склоны	2682	18	Высокопродуктивные почвы	447	3
Очень маломощные почвы	1341	9	ИТОГО, пахотнопригодные земли	3278	22
Очень влажные почвы	596	4	Общая площадь суши	14900	100
Очень бедные почвы	745	5	Земли		

по борьбе с опустыниванием”, утвержденный в декабре 1977 г. Генеральной Ассамблеей ООН.

В 1982 г. Всемирная организация по продовольствию (ФАО) приняла Мировую почвенную хартию, в которой призвала правительства всех стран рассматривать охрану почвенного покрова как всемирного достояния человечества (Всемирная хартия почв, 1983).

В 1988 г. в Европе было создано и успешно работает Европейское общество охраны почв с центром в г. Трир (Германия), объединяющее более 600 ученых и специалистов из 42 стран, включая и почвоведов России.

В соответствии с международным научным проектом “Глобальной оценки деградации почв” в 1991 г., составлена мировая карта деградации почв, о содержании которой кратко уже было сказано выше.

Казалось бы научной общественностью делается не так уже мало, чтобы привлечь внимание правительств всех стран к насущной проблеме сохранения почвенного покрова мира. К сожалению, эффективность этих действий и реализация предлагаемых мероприятий далеко не соответствует их важности. Причин тому множество, в том числе финансово-экономических, но не последнюю роль играет и недостаточное понимание реальности угрозы деградации почв как глобального процесса нарушения устойчивости биосферы и благополучия человека.

В 1992 г. Правительство Российской Федерации утвердило Государственную комплексную программу повышения плодородия почв, в которой отмечается неудовлетворительное состояние сельскохозяйственных угодий, тенденция ухудшения почвенного покрова и соответственно предусматриваются комплекс мер по сохранению плодородия почв [О Государственной программе повышения плодородия почв, 1992].

По инициативе Международной комиссии по экологической безопасности Совета безопасности Российской Федерации в октябре 1993 г. был рассмотрен вопрос о необходимости срочных мер по предотвращению дальнейшей деграда-

Площадь больших почвенных групп и потенциально пахотнопригодных земель  
[Arnold, Szabolcs, Targulian. Global soil change, 1990]

Большая почвенная группа	Общая площадь почвенной группы, млн га	Потенциально пахотнопригодные земли		
		млн га	% общей площади	% площади данной группы
Тундровые	517	0	0	0
Пустынные	2180	430	3,3	20,7
Черноземы и бруниземы	822	450	3,5	54,5
Коричневые выщелоченные	291	110	0,8	37,8
Подзолы	1920	300	2,4	15,6
Красноземы и желтоземы	388	130	1,0	34,2
Оподзоленные				
Ферраллитные	2500	1050	8,1	42,0
Грумосоли и терра росса	525	180	1,3	55,4
Буроземы и рендзины	101	30	0,2	3,0
Андосоли (лепловулканические)	24	10	0,1	41,7
Литосоли (каменистые)	2722	80	0,6	2,9
Регосоли (песчаные)	763	70	0,5	9,2
Аллювиальные	595	350	2,4	58,8
ВСЕГО	13150	3190	24,2	

ции почвенного покрова как угрозы национальной безопасности страны. Рекомендации Межведомственной комиссии не были реализованы. [О мерах по предотвращению деградации почв, 1995].

Не принят пока и Государственной Думой РФ закон об охране почв, необходимость которого не вызывает сомнений.

А между тем один из авторитетнейших экологов мира Жан Дорст еще в 1968 г. предупреждал, что "...ускоренная эрозия почв представляет собой сейчас самое серьезное и самое тяжелое последствие вторжения человека в окружающую его среду [Ж. Дорст, 1968]. Этот выдающийся эколог и зоолог писал: "почва – наш самый драгоценный капитал. Жизнь и благополучие всего комплекса наземных биоценозов естественных и искусственных, зависят в конечном итоге от тонкого слоя, образующего самый верхний покров Земли" [там же, с. 129].

Директор Вашингтонского института глобальных наблюдений Л. Браун [Brown, 1987] также свидетельствует о глобальном характере нарастания процесса разрушения и деградации почв и о самых тяжелых его экологических последствиях.

Важнейшей частью работы в области охраны почв должна быть разработка принципов и методов организации и проведения систематического наблюдения за состоянием почвенного покрова, т.е. почвенного мониторинга.

Если система наблюдений за состоянием атмосферы, суши и морских вод основывается в настоящее время на достаточно широкой сети пунктов слежения и аналитических лабораторий, измеряемой тысячами единиц с ежесуточной обработкой сотен тысяч проб, то сеть наблюдений за состоянием почв крайне ограничена и в сущности еще должным образом не организована (кроме наблю-

дений за температурой и влажностью почв, выполняемых гидрометеорологическими службами). Конечно, почвенный покров представляет систему менее динамичную, чем атмосферный воздух и водоемы. Поэтому при наблюдении за состоянием почв нет необходимости в такой же частоте проб. И все же важнейшая экологическая роль почв в биосфере и жизни человека диктует необходимость организации специального почвенного мониторинга, как части общего мониторинга земель и окружающей природной среды.

В России задачи наблюдений за состоянием почв определяются Постановлениями Правительства “О мониторинге земель” (№ 491 от 15 июля 1992 г.) и “О совершенствовании ведения государственного земельного кадастра в Российской Федерации” (№ 622 от 25 августа 1992 г.). Разработана и утверждена Постановлением Правительства (№ 100 от 5 февраля 1993 г.) “Государственная программа мониторинга земель Российской Федерации на 1993–95 годы”. К сожалению, принятая программа не выполняется должным образом из-за крайне низкого уровня финансового обеспечения (Государственный доклад, 1993 г.)

Промедление с организацией и реализацией комплексного почвенного мониторинга может привести к весьма отрицательным последствиям. Локальное разрушение почвенного покрова, практически необратимые (или требующие капитальных затрат на восстановление) изменения свойств почв в зонах расположения химических и горнодобывающих комбинатов могут произойти в течение ближайших десятилетий; примерно те же сроки характеризуют развитие вторичного засоления и осолонцевания, еще быстрее происходят изменения гидрологического режима и т.п. В результате этого, как и вследствие недостаточно контролируемого отчуждения, возможны значительные потери земель главным образом сельскохозяйственного использования. Почвенный мониторинг позволит своевременно обнаружить неблагоприятные тенденции и принять меры для предупреждения их дальнейшего развития или для осуществления рекультивационных работ [Добровольский, Орлов, Гришина, 1983].

Комплексный почвенный мониторинг должен быть направлен на достижение главных целей: 1) своевременное (раннее) обнаружение неблагоприятных изменений свойств почв и почвенного покрова при различных видах его использования, 2) контроль за состоянием почв по сезонам года (динамика свойств) под сельскохозяйственными культурами для выдачи современных рекомендаций по применению регулирующих мероприятий.

Первая цель связана с теми изменениями почв, которые возникают в результате длительного, многолетнего воздействия однотипных внешних факторов. Эти изменения приводят к коренным изменениям свойств почв или почвенного покрова, если действие факторов продолжается достаточно долго. К таким изменениям относят развитие эрозионных процессов, накопление токсичных металлов в результате промышленных выбросов в атмосферу. Частично такое загрязнение связано с применением некоторых видов удобрений и мелиорантов. К таким изменениям относят прогрессирующее засоление почв при подъеме почвенно-грунтовых вод на неправильно спроектированных оросительных системах. К ним же можно отнести дефицитный баланс гумуса и азота при усиленной минерализации органического вещества и недостатке органических удобрений, нарастание кислотности и расширение площадей кислых почв вследствие выпадения кислых атмосферных осадков и использования кислых минеральных удобрений на не известкованных фонах и т.п. Периодичность наблюдений будет определяться темпами развития контролируемых процессов и промежутки ме-

жду сроками повторных наблюдений могут колебаться от одного года до десятков лет.

Вторая цель мониторинга связана с необходимостью ежегодного прогноза урожайности важнейших сельскохозяйственных культур и выявления находящихся в минимуме условий жизнеобеспечения растений на конкретных посевных площадях. Главным образом, это касается влагообеспечения и обеспечения растений важнейшими элементами питания. Периодичность наблюдений обусловливается физиологическими особенностями возделываемых культур, но, видимо не менее двух-трех раз за вегетационный период.

На современном этапе важнейшими задачами почвенного мониторинга являются следующие:

1) оценка среднегодовых потерь (скорости потерь) почвы вследствие дождевой, ирригационной и ветровой (дефляции) эрозии;

2) обнаружение регионов с дефицитным балансом главных элементов питания растений, обнаружение и оценка скорости потерь гумуса, азота и фосфора;

3) контроль за изменением кислотности и щелочности почв, особенно в районах с внесением высоких доз минеральных удобрений, а также при ирригации, использовании для мелиорации промышленных отходов, и в крупных промышленных центрах, характеризующихся высокой кислотностью атмосферных осадков;

4) контроль за изменением солевого режима орошаемых и удобряемых почв;

5) контроль за загрязнением почв тяжелыми металлами вследствие глобальных выпадений;

6) контроль за локальным загрязнением почв тяжелыми металлами в зоне влияния промышленных предприятий и транспортных магистралей, а также пестицидами в регионах их постоянного использования, детергентами и бытовыми отходами на территориях с высокой плотностью населения;

7) долгосрочный и сезонный (по фазам развития растений) контроль за влажностью, температурой, структурным состоянием, водно-физическими свойствами почв и содержанием в них элементов питания растений;

8) экспертная оценка вероятного изменения свойств почв при проектировании гидростроительства, мелиорации, внедрении новых систем земледелия и удобрений и т.д.;

9) инспекторский контроль за размерами и правильностью отчуждения пахотно-пригодных почв для промышленных и коммунальных целей.

Это наиболее общий и, вероятно, неполный перечень задач, которые должны быть дифференцированы применительно к почвенно-географическому, климатическому и экономическому районированию страны, иными словами применительно к объектам почвенного мониторинга.

Важнейшее место в программе почвенного мониторинга занимает выбор контролируемых параметров, от которых зависит эффективность всей дальнейшей работы. В оптимальном варианте (программа-максимум) мониторинг должен базироваться на трех группах показателей:

1) показатели, характеризующие сезонные или краткосрочные (2–5 лет) изменения свойств почв; эта группа показателей необходима для оценки текущего состояния почвенного покрова в связи с прогнозами урожайности и рекомендациями срочного (сезонного) внесения удобрения, поливов и других мер повышения урожая текущего года;



2) показатели долгосрочных изменений, проявляющихся в течение 5–10 лет и более и отражающие неблагоприятные тенденции изменений свойств в результате антропогенеза;

3) показатели ранней диагностики развития (появления) неблагоприятных изменений свойств почв и почвенных режимов. Для ранней диагностики пригодны биологические тесты, микроморфологические наблюдения, анализ водно-солевого, окислительно-восстановительного и кислотного-основного режимов почвы.

Краткосрочные изменения свойств почв диагностируются по динамике влажности, величинам рН, составу почвенных растворов, дыханию почв, содержанию доступных растениям элементов питания.

Наиболее трудоемки определения показателей долгосрочного изменения почв, поскольку они требуют периодического определения содержания и запасов гумуса, эрозионных потерь почвы, структурного состояния, состава обменных катионов, общей щелочности, кислотности, солесодержания.

Несомненно, при почвенном мониторинге придется использовать различные виды методов. Исключительно важное место займут интенсивно разрабатываемые в настоящее время в различных странах мира аэрофото- и космические методы, которые позволяют выявлять не только структуру почвенного покрова или состояние растительности, но путем изменения спектральной отражательной способности почв количественно (или полуколичественно) характеризовать температуру почв, уровни содержания гумуса, обнаруживать развитие соленакопления и эрозионных процессов. Но хотя дистанционные оптические методы и позволяют получить быструю и большую по объему информацию, они не могут заменить наземные наблюдения и, более того, для дешифрирования такого рода информации необходимы стандартные показатели отражательной способности почв, ее функциональной зависимости от состава и свойств почвы и контрольные (реперные) измерения абсолютных величин измеряемых показателей, которые могут быть найдены только в лабораторных условиях.

Поэтому параллельно с налаживанием регулярных аэрокосмических наблюдений должна быть создана сеть стационарных режимных наблюдений, которые поддаются практически полной автоматизации при дистанционной регистрации (по радиоканалу) результатов измерений. Этими методами можно контролировать влажность почв, температуру, рН, активность важнейших ионов, электропроводность, окислительно-восстановительный потенциал.

Непосредственно в полевых условиях в дополнение к автоматическим или полуавтоматическим анализаторам должны определяться размеры твердого стока или дефляции, уровень дыхания почвы, некоторые биологические показатели.

В лабораторных условиях в периодически отбираемых пробах почв обязательны определения содержания гумуса, карбонатов, легкорастворимых солей, тяжелых металлов, кислотности или щелочности, состава обменных катионов. К числу лабораторных определений следует отнести также анализ биологических, биохимических показателей, включая численность определенных видов микрофлоры, азотфиксирующую способность, ферментативную активность почв. Нет необходимости обосновывать включение в число контролируемых параметров показатели развития урожайности сельскохозяйственных культур.

Почвенный мониторинг позволит не только научно обоснованно осуществлять охрану почв, но уже в первые годы, несомненно, даст значительный экономический эффект. Он позволит подготовить текущие и долгосрочные прогно-

зы на проведение необходимых мероприятий по улучшению свойств почв и повышению их плодородия.

Несмотря на продолжающийся процесс деградации почв, нельзя сказать, чтобы преодоление этого губительного для человека и биосферы явления было делом безнадежным.

Во многих странах мира, в том числе и в России, имеется немало примеров успешного ведения сельского хозяйства, где высокая и устойчивая его продуктивность гармонично сочетается с охраной и повышением плодородия почв. Задача заключается в том, чтобы всеми средствами распространять этот опыт, показывая его экологическую необходимость и экономическую обоснованность.

Блестящим и широко известным примером рационального землепользования в условиях засушливых степей России является знаменитая "Каменная степь" под Воронежем, где в наше время размещается научно-исследовательский институт Центрально-черноземной полосы имени В.В. Докучаева. Здесь полнее всего был осуществлен по проекту Докучаева комплекс работ по борьбе с засухой, что привело к удивительным результатам: мертвая прежде земля стала живой, а опытное хозяйство на ней служит эталоном подлинно разумного, экологически сбалансированного и высоко продуктивного земледелия с неизменно устойчивыми урожаями сельскохозяйственных культур даже в самые засушливые годы.

В еще более критических условиях полупустынных ландшафтов Ногайской степи, где в результате бесконтрольного использования пастбищ начался настоящий процесс "опустынивания" с образованием сыпучих песков, удалось приостановить наступление пустыни. Лесные насаждения, созданные здесь работниками Очкулакской лесной станции, преобразовали пустыню в оазис разумного землепользования.

В результате исследовательских и опытных работ под руководством известного ученого почвовед А.А. Роде на Джанибекском стационаре в полупустыне Прикаспийской низменности была не только доказана, но и осуществлена возможность преобразования скудных солонцовых и солончаковых земель в культурные производительные агролесные ландшафты [Роде, 1974].

Конечно, подобная научная и производственная деятельность по борьбе с деградацией почв и опустыниванием земель нуждается в государственной и общественной поддержке. В этом плане необходимы международные конференции, решения, концепции, рекомендации, внутригосударственные законы и правительственные постановления и программы, которые стимулировали бы экологически обоснованные почвоохранные системы землепользования и земледелия и в то же время предусматривали бы меры административного и экономического контроля и наказания за нарушения правил почвоохранного землепользования.

За последние годы значительно интенсифицировались научные разработки по основам ландшафтно-экологического земледелия [Каштанов и др., 1994], адаптивно-ландшафтного земледелия [Кирюшин, 1993], оптимизации режима органического вещества почв в агроландшафтах [Кирюшин, Ганжара и др., 1993].

Все большее внимание уделяется проблемам охраны почв в университетах и сельскохозяйственных высших учебных заведениях, создаются в этом направлении специальные учебники и учебные пособия [Добровольский, Гришина, 1985; Почвенно-экологический мониторинг, 1994; Кузнецов, Глазунов, 1996]. Несомненно, это является свидетельством понимания опасности дальнейшего расширения деградации почв и необходимости подготовки специалистов по борьбе с этим губительным для человека и биосферы процессом.

## ПРОБЛЕМЫ ЭРОЗИИ И ОХРАНЫ ПОЧВ

Проблема охраны почв очень актуальна, как у нас в стране, так и за рубежом. Это связано с тем, что почва – незаменимый компонент биосферы претерпевает значительную деградацию. В документах конференции ООН по окружающей среде и развитию, проходившей в Рио-де-Жанейро в 1992 г., приведены следующие цифры по степени деградации почвенного покрова Земли: крайняя степень деградации – 1%; сильная – 15%; умеренная – 46%; легкая – 38%.

Здесь же приведены данные по соотношению наиболее распространенных видов деградации почв: водная эрозия – 56%; ветровая эрозия – 28%; химическая деградация – 12%; физическая деградация – 4%. Главенствующая роль эрозии среди других процессов деградации почв связана с ее широким распространением, глубиной и необратимостью изменений почвенного покрова, громадными размерами экологического и экономического ущерба.

По данным Государственного (национального) доклада о состоянии и использовании земель Российской Федерации за 1996 г. – 23% сельскохозяйственных угодий и 27% пашни России эродированы и нуждаются в осуществлении мер по защите почв от эрозии. Эрозионноопасные угодия составляют, 57%. При этом прирост смытых почв в черноземной полосе России достигает в среднем 0,3%, а в некоторых районах – 1% в год. Данные повторных почвенно-эрозионных съемок с интервалом в 30 лет, проведенные на пахотных дерново-подзолистых почвах Валдайской возвышенности, также свидетельствуют об увеличении площади смытых почв примерно на 1% в год. В Молдавии территории, занятые смытыми почвами, “растут с сокрушительной быстротой” (1,0–1,5% в год). Продолжается интенсивное разрушение почв оврагами. Площадь оврагов составляет сейчас примерно 2,4 млн га и ежегодно увеличивается на 0,1–0,2 млн га.

Эрозия почв является наиболее вредоносной из всех видов деградации почв. По образному выражению И.А. Крупеникова, “эрозия выполняет по отношению к почве роль гильотины – она ее в буквальном смысле обезглавливает: лишает верхних гумусовых горизонтов, в которых сосредоточено почвенное плодородие”. Если кислую почву можно нейтрализовать, засоленную – рассолить, солонцеватую – рассолонцевать, уплотненную – разуплотнить, то превратить эродированную почву в неэродированную уже невозможно. К тому же повышенная кислотность, солонцеватость или уплотненность вызывает ухудшение свойств почв только на той площади, где они проявляются, а эрозия почв причиняет ущерб и окружающей территории за счет отложения в поймах продуктов выноса береговых оврагов, заиления водоемов и ухудшения качества воды в них.

Эрозия резко снижает плодородие почвы. Потери урожая при прочих равных условиях зависят от степени смытости почвы. В среднем, на слабо-смытых почвах недобор урожая составляет 10–20%, на среднесмытых – 40–60%, а на сильносмытых – 80% и более. Снижение урожая у разных культур на смытых почвах различается. Урожай зернобобовых культур снижается примерно на 10%, кукурузы – до 60%, а сахарной свеклы – до 80%. Растения, обладающие симбиотической азотфиксацией, слабее реагируют на неблагоприятные свойства смытых почв. Общий по стране недобор урожая из-за эрозии почв примерно 20%.

Почва – не только основное средство сельскохозяйственного производства, но и незаменимый компонент биосферы, аккумулирующий и распределяющий энергию, поступающую благодаря фотосинтезу растений, удерживающий жизненно важные элементы питания, преграждающий путь загрязняющим веществам, регулирующий состав гидросферы и атмосферы, предоставляющий, наконец, экологическую нишу для многих видов живых организмов. Так, масса червей в смытых черноземах Молдавии снижается по сравнению с несмытой в 1,6; 2,2 и 2,6 раза, соответственно, при слабой, средней и сильной смытости. Примерно таковы же соотношения численности всех беспозвоночных. Также падает численность микроорганизмов при увеличении степени смытости. Интегральный показатель биологической активности почв – интенсивность ее “дыхания” в сильносмытом черноземе в 2,5 раза ниже, чем в несмытом.

Процессы эрозии усложняют структуру почвенного покрова, усиливая его контрастность, что связано со смывом, выдуванием и с аккумуляцией почв. Площадь ареалов несмытых почв в два–три раза больше ареалов слабосмытых, и в четыре–семь раз среднесмытых. Такая деградация почвенного покрова, усиливает его фрагментарность и трудности обработки почв.

От эрозии почв страдает не только сельское хозяйство. Почва, смываемая с полей, откладывается в прудах, озерах, водохранилищах и реках, вызывая их обмеление или полное заиление. При стоке воды и смыве почвы с пашни отчуждается от 10 до 30% вносимых удобрений и пестицидов, и они не только безвозвратно теряются, но и оказывают негативное влияние на экологическое состояние территории, особенно на качество воды. Так, радиоактивные изотопы, например  $^{137}\text{Cs}$ , прочно сорбируются почвой и перемещаются вместе с ней. При смыве и дефляции почв происходит перераспределение радионуклидов и образование новых радиоактивных очагов в местах аккумуляции наносов.

Актуален вопрос о темпах эрозии почв и перспективах изменения эродированности почв. Имеется много данных по величинам смыва почв за отдельные ливни или периоды снеготаяния в разных природных и хозяйственных условиях. Несравненно меньше многолетних наблюдений, дающих возможность рассчитать среднегодовые потери почвы. Подобные результаты следует собирать с учетом площади водосбора, так как величина твердого стока обратно пропорциональна площади. Это связано с тем, что в большие реки попадает лишь 1% смываемого материала, до малых рек и водоемов доходит 3–5%, а остальная часть отлагается на пути в нижних частях склонов, балках, в пойме, а также в лесах, лесополосах, на лугах. С элементарного водосбора площадью 5–10 га твердый сток в десятки раз больше, чем с водосбора площадью более 100 км<sup>2</sup>.

Средний многолетний смыв почвы с малых водосборов можно оценить, используя наблюдения ряда авторов по скорости заиления прудов, проведенные в 1940–1950-е годы в ЦЧО, главным образом, в Курской области. По этим данным средняя скорость смыва почвы в этот период составляла 6,7 т/га в год с колебаниями от 3,8 до 10,9 т/га. Близкие к этим значениям величины (8–12 т/га в год) получены для той же зоны А.Г. Рожковым и др. при расчете смыва почвы по мутности воды в реках с учетом площади их водосбора. Позднее, оценив площадь почв разной степени смытости по классификации С.С. Соболева, и принимая мощность горизонтов  $A_1$  и  $B_1$  несмытой почвы, соответственно, 40 и 39 см, а продолжительность распашки почв в ЦЧО 183 года, А.Г. Рожков получил среднюю за 180 лет скорость смыва почвы 3,9 т/га в год с пашни на склонах крутизной более 1°. Величина твердого стока в последние годы выше средней, что связано с вводом в оборот почв все более крутых склонов.

На ключевых участках в зоне серых лесных почв Орловской, Воронежской и Самарской областей среднегодовой смыв колеблется от 5,8 до 6,7 т/га в год. Среднегодовой смыв почвы в разных районах страны колеблется от 3 до 50 т/га, (до сотен тонн в горных районах). Приведенные величины среднегодовых потерь почвы значительно выше принятых сейчас допустимых норм (1–2 т/га в год), обеспечивающих целостность почвенного покрова.

Оценивая перспективы развития эрозии почв, следует рассматривать современные темпы эрозии, и возможное изменение климатических и хозяйственных условий, влияющих на интенсивность эрозионных процессов. Потепление климата, обусловленное парниковым эффектом, приведет к увеличению количества осадков в районах севернее 50° с.ш. и его уменьшению (и увеличению опасности ветровой эрозии) в районах, расположенных к югу от 50° с.ш. Следовательно, следует ожидать усиления ветровой эрозии. Глобальные изменения климата северных территорий могут сказаться также на водной эрозии, усилив солифлюкцию и увеличив интенсивность стока.

В последние 10–15 лет устойчиво ослабилось внимание к судьбе почвенного покрова и мероприятиям по его охране. Переход к многоукладным формам собственности только обострит проблему деградации почвенного покрова. Аренда земли (особенно краткосрочная) без ответственности за ее конечное состояние приведет к дальнейшей потере земельных ресурсов. При любой форме собственности на землю государство не должно слагать с себя ответственности за охрану почв. Необходимо, чтобы оно продолжало финансировать проектные работы по охране почв и осуществление лесомелиоративных и гидротехнических противоэрозионных мероприятий. В США, например, 75% средств, расходуемых фермерами на защиту почв от эрозии, компенсируется государством.

Существенных изменений антропогенных факторов в лучшую сторону в ближайшее время не предвидится. Поэтому эродированные площади почв будут расти прежними темпами – 0,3–1% в год при средней интенсивности потерь почвы порядка 5–15 т/га в год в возвышенных районах Русской равнины.

### **Принципы и методы охраны почв от эрозии**

Проектирование мероприятий по охране почв ведется в настоящее время на основе экономической целесообразности проектных предложений, комплексности, зональности, охвате почвозащитными мероприятиями всей территории водосбора или района проявления ветровой эрозии, стадийности.

Экономическая целесообразность проектных предложений – важнейший принцип проектирования мероприятий по охране почв. Землепользователь действительно будет заботиться об охране и улучшении почв только в том случае, если ему это выгодно. Расходные статьи складываются из затрат на проектирование и осуществление мероприятий по охране почв. Дохода представляют собой прибыль от прироста продукции, обусловленного проведением противоэрозионных мероприятий, и экономии рабочего времени или ресурсов (например, горючего), а также от размера предотвращенного ущерба от потери самой почвы и утраты ряда ее функций, в частности биосферных. Оценить последнюю статью дохода пока не представляется возможным из-за отсутствия апробированных методик, поэтому на практике она не принимается в расчет. Однако даже при таком неполном учете статей дохода осуществление ряда противоэрозионных мероприятий оказывается экономически эффективным. Это чаще всего относится к мероприятиям, выполняющим не только противоэрозионные, но и

водо- и снегорегулирующие функции (обработка почвы и посев культур в направлении горизонталей, глубокая обработка и вспашка с почвоуглублением, ступенчатая вспашка, лункование, прерывистое бороздование, поделка микролиманов, щелевание, использование кулис, снегопахота). Их проведение обеспечивает значительную прибавку урожая из-за улучшения влагообеспеченности растений в маловодные годы. Плоскорезная обработка почвы, помимо почвозащитного и влагонакопительного эффекта, столь важного в аридных районах, требует гораздо меньше дизельного топлива на ее выполнение, чем отвальная вспашка и позволяет провести основную обработку почвы в сжатые сроки. Многие противоэрозионные мероприятия, особенно лесомелиоративные и гидротехнические, не дают быстрой отдачи вложенных средств. Нужна система государственной поддержки земледельцев, применяющих почвозащитные технологии выращивания сельскохозяйственных культур. Следует учитывать не только экономическую, но и экологическую эффективность почвозащитных мероприятий, и часть расходов, не окупающуюся при сложившейся системе подсчета доходов, должно взять на себя государство. Опыт США говорит об эффективности государственных дотаций и кредитной поддержки фермеров, осуществляющих почвозащитные мероприятия.

Другой принцип проектирования – комплексность, взаимная увязка мероприятий, направленных на предупреждение разных видов водной эрозии – при дождях, снеготаянии, орошении, а также ветровой эрозии. Проектные предложения по противоэрозионным мероприятиям должны быть согласованы с проектами по мелиорации почв, по рекультивации земель, строительству дорог, водохозяйственных объектов, производственных и жилых массивов, т.е. проблемы эрозии почв решаются в комплексе с другими задачами землеустройства.

Комплексность предполагает применение для охраны почв от эрозии сочетания мероприятий агротехнических, лесомелиоративных, гидротехнических и организационно-хозяйственных, дополняющих друг друга. Агротехнические мероприятия включают севообороты, системы механической обработки почвы и удобрений. Широкие возможности связаны с использованием почвозащитной роли живой травянистой растительности и ее остатков. Используются занятые пары, промежуточные и совместные посевы, перекрестный и узкорядный посев сельскохозяйственных культур, полосное размещение культур на склонах, почвозащитные севообороты, улучшение естественных кормовых угодий, залужение эродированных участков склонов, мульчирование.

Важный раздел противоэрозионных мероприятий – восстановление плодородия эродированных почв. Необходимы высокие дозы органических удобрений. На смытых почвах урожайность растений под влиянием удобрений повышается в 1,5–2 раза. Чем сильнее эродирована почва, тем больше отдача от внесения удобрений. Чтобы компенсировать потери гумуса при эрозии, надо вносить в почву в 3–4 раза больше органического вещества, чем его было смыто.

Перспективны на смытых почвах сидераты. Обычно применяют люпины, донники, люцерну, клевер, чину, горох, кормовые бобы, вику, сераделлу и др. Высевают их ранней весной, либо летом, после снятия урожая основной культуры. Скошенную зеленую массу можно вывозить на соседние поля, а на месте запахивать отаву и корневые остатки. Эффективность зеленого удобрения при таком способе повышается в 1,5–2 раза.

Весьма эффективны на смытых почвах минеральные удобрения. Поскольку чаще всего в смытых почвах “в минимуме” бывает азот, (а на черноземах – фосфор), то именно эти удобрения следует вносить в эродированные почвы. Количество вносимого азота на смытых почвах зависит от обеспе-

ченности растений влагой. При оптимальном увлажнении доза азота может достигать 90–120 кг/га (на фоне  $P_{60}K_{60}$ ). На смытых черноземах и серых лесных почвах рекомендуемая доза азота составляет 90 кг/га (на фоне  $P_{90}K_{60}$ ). При низкой обеспеченности влагой доза азота меньше: в предгорьях Кавказа –  $N_{30}P_{30}$  (сопровождается влагозадержанием). Эродированные почвы хорошо отзываются на внесение с минеральными удобрениями цинка, молибдена, меди, марганца.

Радикальный метод улучшения свойств почв – гумусовая мелиорация (землевание), которая восстанавливает мощность гумусового горизонта. Гумусированный субстрат для землевания берут с участков, отведенных под строительство, намывных почв подножий склонов, балок, пойм малых рек, илистых отложений прудов [Волощук, 1986].

При линейных формах водной эрозии и интенсивной ветровой эрозии агротехнические мероприятия дополняют агролесомелиоративными. Последние основаны на почвозащитной и водорегулирующей способности древесной и кустарниковой растительности, включают посадку (посев) полезащитных, стоко-регулирующих, прибалочных и приовражных лесных полос на склонах, кольматирующих насаждений по оврагам, балкам и лощинам, и массивов леса на разрушенных оврагами участках.

К гидротехническим мероприятиям относятся технические устройства по задержанию, распылению или отводу временных водных потоков, по регулированию постоянных паводковых потоков, а также по преобразованию мезорельефа для безопасного в эрозионном отношении его использования (террасирование склонов, выполаживание откосов оврагов). Гидротехнические мероприятия применяют, когда агротехнических и агролесомелиоративных недостаточно, на крутых склонах и заовраженных землях. Их отличает высокая эффективность и стоимость. Поэтому гидротехнические мероприятия – завершающее звено в комплексе мероприятий по защите почв от водной эрозии.

Хозяйственные мероприятия, направленные на противоэрозионную организацию территории с учетом фактической эродированности и опасности эрозии почв, обеспечивают правильное сочетание и размещение всех перечисленных выше мер защиты почв от эрозии; ограничивают хозяйственное освоение территории; правильно размещают линейные рубежи (сети лесонасаждений, дорог, простейших гидротехнических сооружений). Создается противоэрозионный “скелет” территории, который увязывает все необходимые в данных условиях почвозащитные элементы и приемы.

Зональность (или необходимость полного учета местных условий) – третий принцип проектирования. Он позволяет правильно подобрать мероприятия, поскольку одни и те же приемы в разных природных условиях действуют неодинаково. Зональность делает невозможным единое для всех зон типовое применение противоэрозионных и противодефляционных мероприятий.

В районах недостаточного увлажнения противоэрозионные мероприятия направлены на задержание влаги на полях, в районах избыточного увлажнения – на безопасный сброс излишков воды. Мероприятия по созданию искусственного микрорельефа характерны для обеих групп, тогда как вспашка под небольшим углом к горизонталям и нарезка водоотводных борозд – для районов достаточного и избыточного увлажнения. Есть, однако, и интразональные противоэрозионные мероприятия, например, глубокая вспашка и вспашка с почвоуглублением.

Значение имеет также источник стока: дождь или тающий снег. Г.П. Сурмач и другие авторы показали, что в северных районах и на Русской равнине

средний в севообороте смыв почвы тальми водами в два и более раза превосходит дождевой смыв, южнее изолинии среднего стока с зяби 15 мм интенсивность обоих типов смыва равна, а южнее, дождевая эрозия преобладает.

Оказывает влияние на выбор противоэрозионных мероприятий тип склона (простой; односкатный или многоскатный). Эффективно создание замкнутых микронеровностей на сложных склонах, тогда вода не концентрируется в потяжинах. Но простое бороздование неприменимо на сложных склонах.

Крутизна склона в значительной мере определяет емкость микроформ рельефа. Поэтому лункование и прерывистое бороздование, а также устройство микролиманов более эффективны на пологих склонах (не более 3°). Щелевание, полосное рыхление и кротование особенно эффективны на более крутых склонах.

Большое значение имеет водопроницаемость почв. Любые мероприятия по ее повышению сами по себе или в комплексе с водозадерживающими мероприятиями очень полезны. Их почвозащитная эффективность тем больше, чем меньше исходная водопроницаемость почвы.

Важнейшим принципом является охват противоэрозионными мероприятиями одновременно всей территории водосбора от водораздела до базиса эрозии. При невозможности такого охвата всей территории водосбора необходимо планировать их последовательное осуществление, начиная с приводораздельных пространств и заканчивая подножием склона. Это требование следует из механизма формирования стока на склоне. На любом участке склона приходная часть стока состоит из двух частей: сформировавшейся на этом участке и поступившей с вышележащего участка. Чем дальше от водораздела расположен участок склона, тем больше доля стока, поступающего с вышележащих участков. Поэтому прежде, чем приступать к регулированию стока, формирующегося на данном участке склона, необходимо зарегулировать его на вышележащем участке. Регулировать сток необходимо сразу на всем склоне. То же требование справедливо для противодефляционных мероприятий.

Сейчас в области разработки почвозащитных систем земледелия наиболее важен перевод их на ландшафтную основу. Улучшение систем земледелия должно идти по пути технологической дифференциации и максимального использования присущих ландшафту механизмов саморегуляции и самоорганизации. При проектировании почвозащитных систем земледелия для региона используют в качестве основы мелко- или среднемасштабные ландшафтные карты и карты физико-географического районирования отдельных регионов. На локальном уровне нужны крупномасштабные ландшафтные карты с выделами урочищ и подурочищ. Поскольку ландшафтных карт крупного масштаба пока мало, следует использовать крупномасштабные почвенные карты.

Ландшафтный подход позволяет избежать крупных ошибок при проектировании, в частности, исключить случаи объединения в одном поле разнородных участков или неоправданного разделения границами угодий или полей однородных природных комплексов.

Сочетание географического (ландшафтного) подхода к разработке систем земледелия с гидрологическими, гидравлическими и аэромеханическими методами расчета отдельных их элементов, базирующимися на моделях эрозионных процессов, – одно из основных направлений исследований в области защиты почв от эрозии.



## Горизонтальная миграция загрязняющих веществ при водной эрозии почв

Почвы сельскохозяйственных угодий – это тот компонент ландшафта, в который преднамеренно привносится огромная масса химических и биологических веществ (удобрений, пестицидов), которые при некоторых условиях загрязняют и саму почву, но главное, попадая в другую геохимическую обстановку, часто выступают как загрязнители окружающей среды.

В особом подходе нуждается оценка эрозионного перераспределения радиоактивных загрязнителей ввиду специфического воздействия радионуклидов на человека и способностью их к самораспаду. Радионуклиды попадают в почву в при авариях и испытаниях атомного оружия, выпадая из атмосферы на обширных площадях с постоянно изменяющейся по территории плотностью загрязнения (рис. 30, 31).

Главным источником радиоактивного загрязнения окружающей среды в европейской части России являются радионуклиды Чернобыльского выброса. Основной радионуклид-загрязнитель –  $^{137}\text{Cs}$  с периодом полураспада около 30 лет. Радиоцезий весьма прочно сорбируется твердой фазой почвы, в почвенный раствор переходит от сотых до десятых долей процента его валового содержания.

Резервуар радионуклидов выброса Чернобыля – загрязненный почвенный покров, из которого они попадают в другие объекты окружающей среды, включаясь в малый биологический и большой геологический круговороты.

Наибольшему загрязнению по интенсивности подверглась Брянская область, где часть территории стала зоной отчуждения, а наибольшему загрязнению по площади – около 58% – Тульская область.

Основное количество радионуклидов сконцентрировано в поверхностных горизонтах почв, поэтому эрозионные процессы определяют горизонтальную миграцию радионуклидов на склоновых землях. Однако количественная оценка этого процесса и его прогноз для загрязненных территорий не проводили.

Наши исследования проводили в районах Брянской и Тульской областей, наиболее пострадавших от Чернобыльской аварии. Эти территории существенно различаются по ряду факторов, определяющих эрозионную обстановку.

На западе Брянской области преобладают дерново-подзолистые легкосуглинистые и супесчаные почвы, слабое расчленение ложбино-балочной сетью, пологие склоны. Для юго-запада Тульской области характерны выщелоченные черноземы, серые лесные почвы суглинистого гранулометрического состава, густое и глубокое расчленение балочно-ложбинной сетью, преобладание покатых склонов. На Брянщине главный фактор, способствующий эрозии, – низкая противозэрозионная стойкость почв, в Тульской области – эрозионноопасный рельеф, высокая (> 70%) распаханность территории.

Методика оценки миграции радиоцезия с твердыми продуктами эрозии почв включала ряд этапов:

На первом этапе проводили эрозионно-морфологическое районирование, позволяющее разделить территорию на ареалы схожие по геоморфологическому строению, морфологическим показателям именно распахаемых склонов, характеру и сельскохозяйственному использованию территории.

Районирование, как и остальные картографические работы, выполняли в среднем масштабе, выбор которого определяется средним масштабом оформления материалов Генеральных схем противоэрозионных мероприятий и официальных результатов обследований радиационной обстановки.

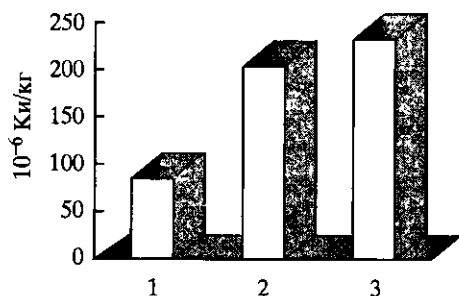


Рис. 30. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  ( $10^{-6}$  Ки/кг) в поверхностном слое почвы и транспортируемом материале

1 – несмытая почва (1–10 см); 2 – аллювиальный нанос (0–4 см); 3 – аллювиальный нанос (0–1 см).

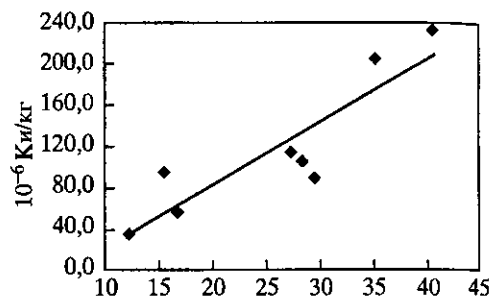


Рис. 31. Связь между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в почве ( $10^{-6}$  Ки/кг) и содержанием в почве частиц менее 0,01 мм в диаметре (С, %)

Затем для выделения эрозионно-морфологических ареалов по методике наиболее репрезентативной для обследуемого региона рассчитывается среднегодовая интенсивность смыва почвы и составляются соответствующие карты (рис. 32). Таковой являлась методика, разработанная в Всероссийском НИИ земледелия и защиты почв от эрозии, в модификации, позволяющей перейти от крупного масштаба к среднему.

На заключительном этапе карту интенсивности смыва совмещают с картой радиационной обстановки и, умножая удельную радиоактивность  $^{137}\text{Cs}$  в 20 см слое пахотной почвы на среднюю интенсивность смыва для соответствующего эрозионно-морфологического ареала, рассчитывают интенсивность выноса радиоцезия с твердыми продуктами эрозии для каждого эрозионно-морфологического ареала.

Результаты исследований показали, что интенсивность эрозионных процессов на изучаемых территориях неравномерна. В западных районах Брянской области она практически равна нулю в пойменно-террасовых эрозионно-морфологических ареалах и болотах, ввиду малых уклонов поверхности, а также в лесах и на задернованных склонах овражно-балочной сети из-за высокой противозерозной эффективности растительного покрова. Слабый смыв почвы наблюдается в придолинно-террасовых и водораздельно-плакорных ареалах, далее смыв возрастает в придолинно-склоновых до 2–4 т/га в год и достигает максимальных значений (4–5 т/га в год) в водораздельно-плакорно-грядовых ареалах.

Интенсивная миграция радиоцезия с твердым стоком сконцентрирована в бассейне реки Ипуть (максимум составляет 38 мКи/км<sup>2</sup> в год) (рис. 33). В бассейне реки Беседь миграция радиоцезия с продуктами эрозии в целом ниже, хотя в одном из ареалов они достигают рекордного уровня – 41,5 мКи/км<sup>2</sup> в год.

В юго-западных районах Тульской области смыв почвы увеличивается от нулевого в пойменно-террасовых ареалах до двух-трех для центральных и до 5 т/га в год для местных водоразделов, достигая наибольших значений в придолинных (до 6–7) и особенно в присетевых эрозионно-морфологических ареалах (до 7–8 т/га в год). Максимальные темпы миграции радиоцезия с продуктами эрозии почв отмечаются в бассейне реки Плавы – до 31 мКи/км<sup>2</sup> в год.

Несмотря на то что плотность загрязнения радиоцезием на западе Брянской области гораздо выше, чем на юго-западе Тульской, темпы его миграции с продуктами эрозии почв на этих территориях оказываются вполне сопоставимыми.

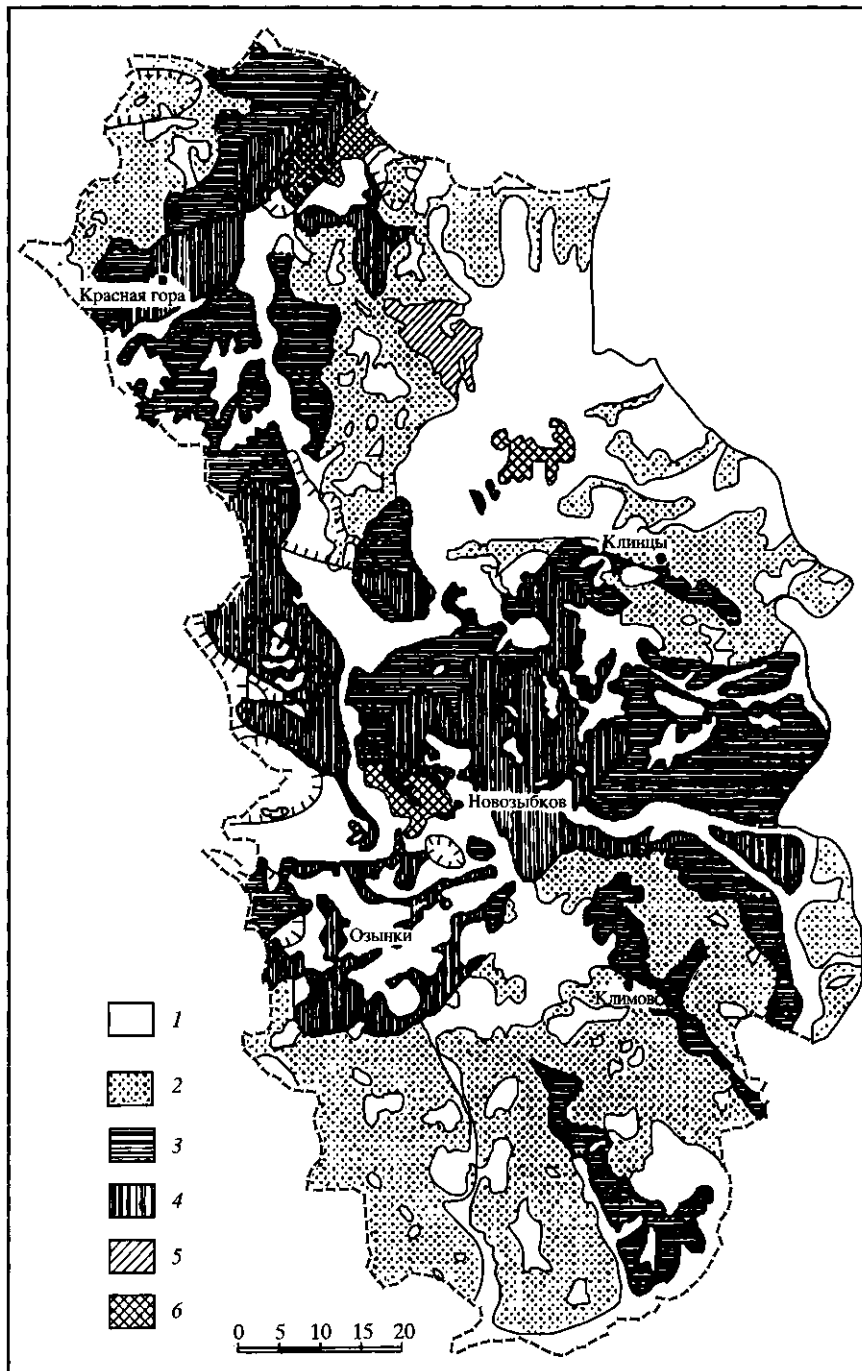


Рис. 32. Интенсивность миграции радионуклидов в почвах Брянской области  
 1 - 0; 2 - 0-5; 3 - 5, 1-10; 4 - 10, 1-20; 5 - 20, 1-30; 6 - 30, 1-45

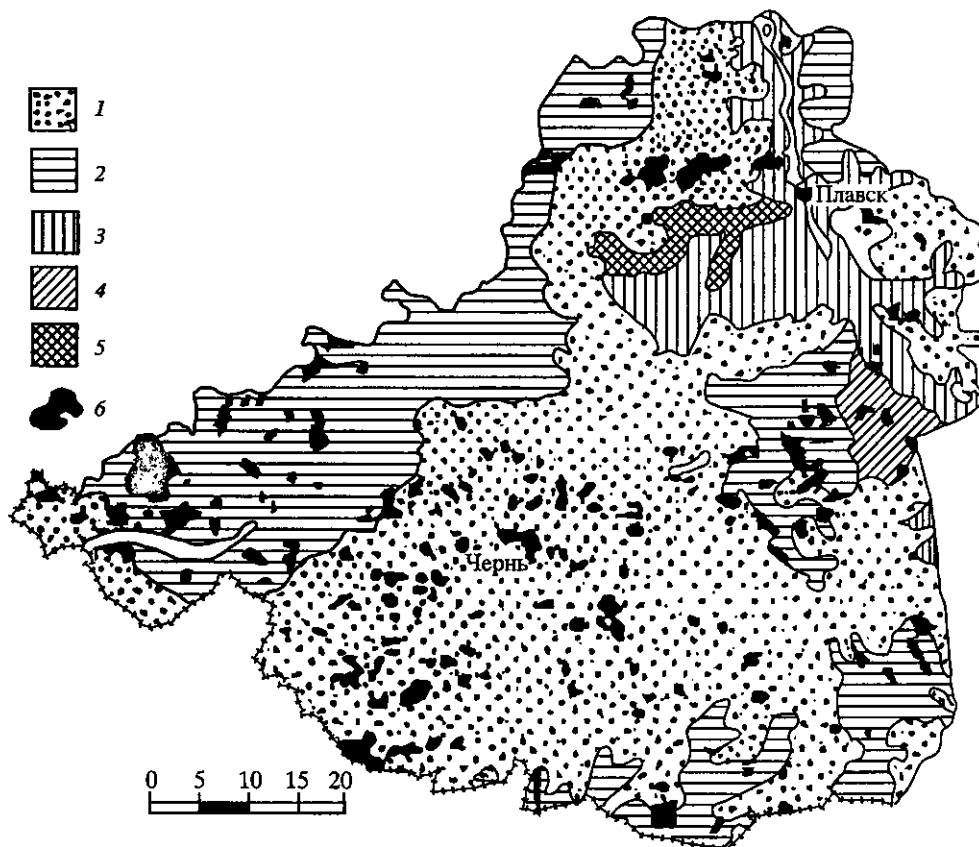


Рис. 33. Интенсивность миграции радионуклидов в почвах Тульской области  
 1 – 0–5,0; 2 – 5,1–10,0; 3 – 10,1–20,0; 4 – 20,1–30,0; 5 – 30,1–45,0; 6 – лесные угодья

Причина этого – весьма существенные различия в интенсивности эрозионных процессов между рассматриваемыми регионами.

Вклад смыва почв в баланс радиоцезия на склоновых землях кажется небольшим – в среднем ежегодно смываются десятые доли процента от общего запаса нуклида в почве, тогда как убыль нуклида из почвы за счет снижения удельной радиоактивности вследствие радиоактивного распада в первые 30 лет после выброса составляет примерно 1,5–2% в год (рис. 34, 35). Но эта величина примерно в 20 раз превышает отчуждение радиоцезия с урожаем сельскохозяйственных культур. На современном этапе фактор эрозии является, как минимум, вторым по значимости в расходной статье баланса радиоцезия на пахотных склонах.

Предлагаемый подход к оценке и прогнозу горизонтальной миграции веществ с твердыми продуктами эрозии можно использовать для любого долгоживущего загрязнителя, связанного с твердой фазой почвы.

Вынос радиоцезия с твердыми продуктами эрозии не ухудшает радиационную обстановку. Он даже способствует очищению размываемых почв. Но за смывом неизбежно следует отложение и аккумуляция смытого материала.

Как отмечено выше, в большие реки попадает только 1% смываемого материала, до малых рек и водоемов доходит 3–5%, а основная часть твердых про-

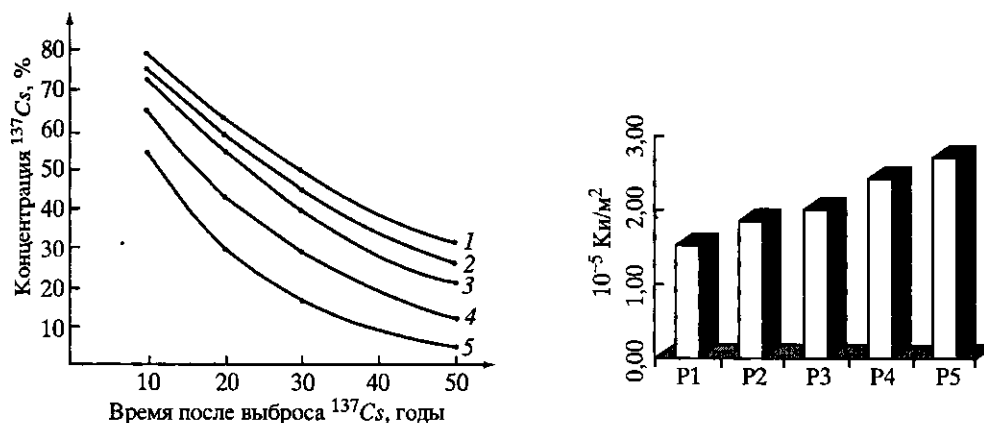


Рис. 34. Динамика относительной концентрации  $^{137}\text{Cs}$  (в % к концентрации в 1986 г.) на эродируемых пахотных склонах

Интенсивность смыва почвы (т/га в год): 1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 50; 5 – 100

Рис. 35. Запасы  $^{137}\text{Cs}$  в дерново-подзолистых почвах различной степени эродированности почвы:

P1 – среднесмытая почва; P2 – несмытая; P3 – смыто-намытая, P4 – средненамытая; P5 – сильнонамытая

дуктов эрозии отлагается по пути движения потока воды. Площадь территорий с преобладанием аккумуляции существенно меньше, чем площадь, с которой приносится аккумулярующий материал. В Брянской области в тальвегах балок может накапливаться в 6–12 раз больше материала, чем смывается с той же (равновеликой) площади склоновых земель.

Таким образом, зоны аккумуляции твердого стока должны рассматриваться как потенциальные очаги вторичного загрязнения почвенного покрова радиоцезием. В реальных ландшафтах эти очаги совпадают с ареалами распространения намытых почв.

Изучение распределения радиоцезия в зависимости от эродированности почв на модельном участке в Брянской области, включающим склоны и относительно замкнутое понижение, показало, что запасы радиоцезия в поверхностном слое увеличиваются в ряду: смытая-несмытая – смытонамытая и намытая почвы. В намытых почвах, в центре местной депрессии, запасы радиоцезия в 30 см слое оказались в 1,5–2 раза больше, чем в несмытой почве, причем такая дифференциация произошла всего за 7 лет.

Увеличение обусловлено нарастанием почвенного слоя при отложении продуктов эрозии, и обогащенностью отложенного материала радиоцезием. Удельная радиоактивность нуклида в наносах может превышать таковую в размываемой почве в два раза и более. Эффект связан с резкой дифференциацией отлагающихся продуктов эрозии по гранулометрическому составу, что характерно при эрозии легких слабооструктуренных почв. Вывод подтверждается обнаруженной зависимостью между удельной радиоактивностью почв и продуктов эрозии и содержанием в них физической глины.

Выявленные закономерности позволяют внести соответствующие поправки к расчету интенсивности выноса радиоцезия с твердыми продуктами эрозии. Для обследованных нами регионов Брянской области среднегодовые темпы выноса радиоцезия в эрозионно-морфологических ареалах должны быть увеличены в 1,5–2,5 раза. При расчетах величину выноса радиоцезия

следует умножать для легких слабоструктурных почв на коэффициент 1,8, а для суглинистых, где селективный вынос механических элементов почвы выражен слабее – на 1,2.

В настоящее время учение об охране почв от эрозии (эрозиоведение) вполне оформилось как самостоятельное направление почвоведения. Во многих случаях достигнуты хорошие практические результаты в деле защиты почв от эрозии как за рубежом, так и у нас. В США, за период с 1982 по 1992 год, средняя интенсивность водной эрозии снизилась с 9,2 до 6,9 т/га в год, а ветровой – с 7,4 до 5,6, причем на сильноэродированных почвах, охваченных восстановительными программами, интенсивность смыва почв снизилась за этот же период еще сильнее: с 19,3 до 1,3 т/га в год, а выдувания – с 24,0 до 2,0. В разных районах нашей страны также есть примеры бережного отношения к почве и воде, заметного повышения плодородия почвы. В ряде степных районов Сибири (особенно Алтайского края), Южного Урала, а также Казахстана ветровая эрозия резко ослабла в результате внедрения почвозащитной системы земледелия, разработанной ВНИИ зернового хозяйства. При этом прибавки урожая зерновых культур составили 2,5–3,5 ц/га. По данным ЦСУ СССР среднегодовые объемы проведения почвозащитной плоскорезной обработки почвы увеличились с 22,9 млн га в период 1971–1975 гг. до 47,2 млн га в 1981–1986 гг., а посев специальными эрозионными сеялками с 20,4 до 42,8 млн га.

Значительные успехи в охране почв от совместного проявления ветровой и водной эрозии достигнуты в Алтайском крае, а от водной – в отдельных хозяйствах республик Поволжья, Московской, Ивановской, Брянской областей, а также в Белоруссии. Но в целом по России внедрение противоэрозионных мероприятий еще очень мало. Современные научные разработки по проблеме охраны почв в сложившихся условиях не находят достаточного применения. Наблюдается явное противоречие между уровнем исследований по охране почв (и почвоведения вообще) и использованием их достижений на практике.

Одна из причин возникновения этого противоречия заключается в том, что затраты на проведение противоэрозионных мероприятий оказываются значительно больше, чем немедленная прибыль от их применения. Даже в засушливых районах, где противоэрозионные мероприятия одновременно служат накоплению влаги в почве, не все из них окупаются прибавкой урожая в том же году. Лесомелиоративные мероприятия, например, а тем более гидротехнические, окупаются только через много лет. Землепользователь может ожидать прибыль от проведения комплекса почвозащитных мероприятий в среднем через 5–10 лет. Лишь немногие землепользователи могут позволить себе такие затраты. В то же время ясно, что в конечном счете при длительном землепользовании почвозащитная система земледелия себя окупит и даст прибыль землепользователю. Выиграет при этом и государство в целом, так как сохранится почва как элемент биосферы и необходимое условие жизни человека. Однако в этом случае землепользователь может рассчитывать на моральную и материальную поддержку всего общества, заинтересованного в его почвоохранной деятельности.

В развитых индустриальных странах фермеры получают существенную финансовую дотацию от государства, так как для сельского хозяйства вообще характерен более медленный оборот капитала по сравнению с промышленностью, а тем более с торговлей. Система дотаций и льготных кредитов дает возможность государству стимулировать внедрение фермерами почвозащитных технологий. Опыт США, Германии и ряда других стран свидетельствует о высокой эффективности такой политики.

В нашей стране в соответствии с действующим сейчас “Земельным кодексом РСФСР” (ст. 50) проведение мероприятий по охране почв, повышению их качества, материального стимулирования земледельцев за осуществление этих мероприятий должно проводиться за счет средств, поступающих в качестве платежей за землю. При этом лишь 9% от суммы земельного налога и арендной платы поступает в федеральный бюджет, а 91% – в бюджет территорий. Однако согласно данным Государственного (национального) доклада о состоянии и использовании земель РФ за 1996 г. субъектами Российской Федерации было использовано на эти цели лишь 33% от общего объема поступлений. В связи с этим становится ясной причина неудовлетворительного выполнения в 1996 г. работ второго этапа программы “Плодородие”. В частности, годовое задание на создание противоэрозионных овражнобалочных насаждений выполнено на 35%, а на посадку полезащитных лесных полос – лишь на 6,1%. По другим видам противоэрозионных мероприятий данные не приведены.

Таким образом, для реализации на практике достижений в области охраны почв от эрозии необходимо прежде всего принимать меры общегосударственного характера, обеспечивающие полное и своевременное финансирование почвоохранной деятельности. Кроме того, учитывая опыт США, необходимо создать специальный орган – Службу охраны почв для контроля за соблюдением юридических актов по рациональному использованию почвенных ресурсов земледельцами, организации практической работы по охране почв, создания опытно-показательных пунктов по защите почв от эрозии на базе научных учреждений и учебных заведений, а также ряда других задач, связанных с перечисленными выше.

#### *Глава 4*

### **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ АГРОХИМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В АГРОБИОЭКОСИСТЕМАХ**

Почва как биокосная оболочка Земли выполняет жизненно важные функции всей биосферы, а ее высокое плодородие – основа существования цивилизаций на нашей планете. Всестороннее удовлетворение материальных и иных потребностей постоянно растущего народонаселения мира требует активного баланса биогенных элементов в экосистемах, развития малого круговорота жизненно важных минеральных веществ педосферы по спирали, что невозможно без расширенного воспроизводства плодородия почвы.

Следовательно, интенсивное антропогенное воздействие на почвенный покров при ведении современного земледелия, в том числе и применением агрохимических средств, оказывает многостороннее воздействие на экосистемы; оптимизирует параметры физических, химических и биологических свойств почвы, способствует не только сохранению, но и расширенному воспроизводству ее плодородия; изменяет структуру микробиоты в почве, усиливает активность в ней биологических процессов; оптимизирует факторы развития культурных растений, что особенно важно в условиях возрастающего глобального и локального техногенного загрязнения окружающей среды; повышает устойчивость экологических функций почвы как сферы обитания живых организмов.

Если же учесть, что интенсивное использование агрохимических средств оказывает определенное влияние на биогеохимию ландшафтов, а также на химию литосферы, гидросферы и атмосферы, то можно отметить и несомненное воздействие агрохимии на общие циклы биогенных элементов в природе, т.е. на экологические функции всей биогеосистемы.

В связи с тем, что агрохимия регулирует круговорот веществ в системе почва–растение, она является стержневым вопросом земледелия. Без нее нельзя решить такие актуальные проблемы как воспроизводство плодородия почвы, создание оптимальных условий питания культурных растений за счет рационального использования минеральных, органических и биологических средств (удобрения, сидерация, химические мелиоранты, биологические препараты и другие).

Альтернативы агрохимии нет. Ведь агрохимические средства оказывают многостороннее прямое и косвенное действие на почву и растение, ибо “удобрение” (по Д.Н. Прянишникову) может содержать пищу для растений, усиливает мобилизацию питательных веществ в почве, повышает энергию жизненных процессов в ней и изменяет свойства самой почвы. Различные виды минеральных удобрений, органические удобрения (от навоза до соломы и сидератов), химические мелиоранты, местные сырьевые агрохимические ресурсы, применяемые для производства или непосредственно в качестве удобрений, отходы разных отраслей промышленности и коммунального хозяйства, используемые в качестве удобрений и мелиорантов, а также биологические препараты (удобрения) – все это является предметом агрохимии.

Следовательно, агрохимия влияет на многосторонние экологические функции почв в агроэкосистемах, но это влияние пока еще недостаточно представлено в научных публикациях и при реализации ее достижений в современных высокопродуктивных технологиях ландшафтного земледелия. Поэтому в данном разделе обсуждаются наиболее важные и, в определенной степени изученные экологические функции агрохимии, обеспечивающие биопродуктивность агробиоценозов и качество растительной продукции. Важнейшая проблема современного земледелия – воспроизводство плодородия почв. Хорошо известно, что многоплановые экологические функции почвы в значительной мере определяются степенью ее окультуренности, высоким уровнем плодородия с оптимальными параметрами физических и химических свойств, достаточной биологической активностью. А это возможно при комплексном использовании органических и минеральных удобрений, химических мелиорантов как важнейшего звена научного земледелия.

При реализации достижений науки и решении практических задач агрохимия тесно связана с почвоведением, земледелием, почвенной микробиологией, что и позволяет более эффективно использовать агрохимические средства, обеспечивающие оптимизацию свойств почвы и содержание в ней основных питательных веществ. Это хорошо подтверждается данными, полученными в длительных стационарных опытах (табл. 77).

В результате комплексного длительного использования агрохимических средств – минеральных, органических удобрений и известкования почвы созданы оптимальные параметры по ее физико-химическим свойствам, содержанию подвижного фосфора и обменного калия.

За последние годы во всех земледельческих районах России усиливаются темпы падения плодородия почв, ускоряются процессы минерализации гумуса. Изменяется порядок отзывчивости культур севооборота на питательные эле-



Таблица 77

**Экологические свойства функции дерново-подзолистой почвы  
после 41-летнего применения системы агрохимических средств**

Ва- риант	pH <sub>KCl</sub>	Nг, мг- экв./100 г почвы	Подв. Al, мг/100 г почвы	S, мг- экв./100 г почвы	V, %	Гумус, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г почвы	K <sub>2</sub> O, мг / 100г почвы
Фон – контроль								
0	4,37	4,25	3,2	7,2	62,9	1,96	6,0	3,0
NPК	4,12	6,20	6,4	5,6	47,4	2,26	22,0	24,0
Фон + известкование								
0	6,87	1,05	0,49	9,8	90,3	2,18	10,0	10,0
NPК	6,88	1,20	следы	11,3	90,4	2,58	18,0	20,0
Фон + известкование + органическое удобрение								
0	6,90	1,00	0,18	13,0	92,9	3,16	9,3	16,0
NPК	6,92	1,20	0,09	11,8	90,7	3,78	26,2	22,4

менты. Например, ранее в степных районах России повышенная отзывчивость культурных растений отмечалась на фосфор. В настоящее время заметно возрастает действие азота на продуктивность основных культур севооборота. Одновременно в этих районах отмечается положительное действие калийных удобрений на биопродуктивность агроценоза, в то время как в прежние годы они, как правило, были не эффективны.

Что же касается дерново-подзолистой зоны, то здесь отмечена высокая эффективность агрохимического окультуривания почв [Войтович, 1997]. На примере анализа производственных данных 360 хозяйств Московской области установлено, что увеличение содержания гумуса с 1,5 до 3,1–4,0% обеспечивало рост урожайности с 17,0 до 21,3 ц/га. В наибольшей мере на продуктивность зерновых культур влияла степень обеспеченности почв подвижными фосфором. С увеличением его содержания от среднего до высокого урожайность возрастала на 11,4 ц/га. Весьма существенным оказалось также влияние содержания обменного калия на урожайность зерновых культур. Так, повышение содержания этого биогенного элемента в почве с 81–120 до 171–259 мг на 1 кг почвы повышало урожайность зерновых культур с 14,9 до 25,4 ц/га (табл. 78).

Несомненно важный показатель, определяющий реализацию экологических функций почвы является ее гумусное состояние. За последние годы наблюдается стремление к интенсивному использованию потенциального плодородия почв путем насыщения севооборотов пропашными культурами, использование пашни в виде чистого пара, интенсивная обработка почвы и т.д. Одновременно снижается использование органических удобрений, наблюдается недооценка посева сидеральных культур. Все это приводит к активизации процессов минерализации органического вещества почвы, к ухудшению ее гумусного состояния. По данным Почвенного института им. В.В. Докучаева потери гумуса на черноземах за 100 лет составили 25–30% его запасов. В среднем с 1 га пашни ежегодно теряется около 400–600 кг гумуса, а там, где сильно развиты процессы эрозии, потери гумуса доходят до 1 т/га. Например, в Центрально-Черноземной зоне 100 лет назад преобладали почвы с содержанием гумуса от 7 до 10%, в

Влияние уровня содержания гумуса,  $P_2O_5$  и  $K_2O$  в дерново-подзолистой почве на урожайность зерновых культур в Московской области [Войтович, 1997 г.]

Агрохимический показатель		Внесено		Урожай зерна, ц/га	Число хозяйств
		органические удобрения т/га	минеральные удобрения кг/га		
Содержание гумуса, %	1,5–2,0	12,2	262	17,0	68
	2,1–2,5	15,5	274	19,0	79
	2,6–3,0	16,0	289	20,0	53
	3,1–4,0	16,8	303	21,3	42
Содержание подвижного $P_2O_5$ , мк/кг	51–100	10,6	237	13,1	40
	101–150	11,0	277	17,9	175
	151–200	16,8	300	22,1	98
	201–250	20,7	269	24,5	31
Содержание, $K_2O$ мг/кг	81–120	13,2	261	14,9	95
	121–170	13,7	264	15,3	190
	171–250	22,5	337	25,4	74

результате же длительного сельскохозяйственного использования содержание гумуса в черноземах снизилось до 4–7%.

В.И. Лазарев [1997] приводит данные по влиянию различных агроэкосистем на накопление (0–40 см) корневых и пожнивных остатков и динамику содержания гумуса, полученные в длительном стационарном опыте на типичном черноземе. Исследования проводились в севооборотах с различным соотношением в них посевных площадей пропашных культур (сахарная свекла, кукуруза), зерновых и бобовых трав. Чередование культур в каждом севообороте проводилось на фоне без удобрений и органо-минеральной системы удобрений (табл. 79).

Растительные остатки лишь на 35–40% восполняют потери гумуса в севообороте без применения удобрений. Наибольшее количество корневых и пожнивных остатков было после бобовых трав.

Они в большей степени обогащены и азотом. Поэтому введение в пятипольный севооборот одного поля многолетних бобовых трав с органо-минеральной системой удобрений приводило к стабилизации содержания гумуса на исходном уровне, а при насыщении ими севооборота на 40% (два поля) наметилась тенденция расширенного воспроизводства гумуса в почве типичного чернозема. Причем, внесение органических и минеральных удобрений усиливало процессы гумификации растительных остатков, повышало содержание гуминовых кислот в 2,2–2,5 раза по сравнению с неудобренными вариантами, что способствовало увеличению соотношения  $C_{гк} : C_{фк}$ .

Заслуживают внимания результаты исследований значения удобрений и севооборотов в регулировании содержания гумуса в окультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почве [Курмышева и др., 1996]. Исследования проводились в длительном стационарном опыте. За базовый вариант удобрений принят NPK, где все элементы питания внесены в виде минеральных удобрений в дозах на планируемый урожай. В вариантах органо-минеральной системы удобрений учитывается фактическое количество NPK, вносимое с органическими удобрениями, а дозы NPK минеральных удобрений определялись по разнице до базового уровня. В данном сообщении представлены два севооборота.

Таблица 79

**Влияние агроэкосистем на накопление корневых и пожнивных остатков и динамику содержания гумуса в почве (0–40 см) (пять ротаций пятипольных севооборотов)**

Севооборот	Вариант	Корневые и пожнивные остатки, т/га		N, кг/га		Содержание гумуса, %		
		за 25 л	за 1 г	за 25 л	за 1 г	Начало первой ротации	Конец пятой ротации	Разница
60% зерновых, 40% пропашных	1	76,5	3,06	914	36	6,04	5,60	-0,44
	2	90,9	3,64	1145	45	6,09	5,64	-0,45
20% чистый пар, по 40% зерновых и пропашных	1	55,6	2,22	771	30	6,03	5,56	-0,47
	2	63,9	2,56	963	38	6,09	5,71	-0,38
40% зерновых, 60% пропашных	1	75,6	3,02	984	39	6,03	5,57	-0,46
	2	82,4	3,29	1089	43	6,07	5,58	-0,49
20% боб. трав, по 40% зерновых и пропашных	1	80,1	3,20	1186	47	6,04	5,69	-0,35
	2	89,4	3,58	1403	56	6,08	6,04	-0,04
20% однол. трав, по 40% зерновых и свеклы	1	66,9	2,67	836	33	6,04	5,61	-0,43
	2	83,8	3,35	1106	44	6,08	5,62	-0,46
40% бобовых трав, 40% зерновых, 20% пропашных	1	88,1	3,52	1130	45	6,04	5,87	-0,17
	2	99,1	3,96	1360	54	6,08	6,15	+0,07

*Примечание.* 1 – без удобрений, 2 –  $N_{200}P_{250}K_{250} + 20$  м/га навоза за ротацию севооборота.

1. Плодосменный с чередованием культур: картофель, ячмень, клевер первого года пользования, клевер второго года пользования, озимая пшеница (20% пропашных).

2. Пропашной: картофель, ячмень, кукуруза, ранний картофель, озимая пшеница (60% пропашных).

Итоги исследования по двум ротациям севооборотов (за 10 лет) представлены в табл. 80.

Следовательно, система удобрения и структура севооборотов оказывали заметное влияние на процессы гумусонакопления. Органоминеральная система удобрений имела некоторое преимущество перед минеральной по накоплению гумуса и его качественному составу.

В плодосменном севообороте с двумя полями клевера и внесением минеральных и органических удобрений (6 т/га) в течение 10 лет обеспечивало положительный баланс гумуса и способствовало изменению типа гумуса. С повышением доз органических удобрений до 25 т/га в год в пересчете на подстилочный навоз достоверно увеличивалось содержание гумуса в слое 0–20 см к концу второй ротации плодосменного севооборота. В пропашном севообороте за этот период отмечалась тенденция повышения содержания гумуса и улучшение его качественного состава при применении органоминеральной системы удобрений, в составе которой доза органических удобрений составляла 16–25 т/га в год.

**Изменение содержания гумуса в почве в зависимости от системы удобрений  
и структуры севооборота [Курмышева и др., 1996 г.]**

Вариант, органические удобрения в т.; минеральные в кг д.в. на 1 га (среднее из двух ротаций)	Среднегодовая доза орг. удобрений в пересчете на подст. навоз, т/га	Содержание гумуса, %		C <sub>гк</sub> : C <sub>фк</sub>	
		Исходная почва	Через 10 лет	Исходная почва	Через 10 лет
Севооборот 1					
1. Без удобрений	–	2,12	2,07	0,36	1,09
2. N <sub>450</sub> P <sub>382</sub> K <sub>705</sub> на планируемый урожай	–	2,16	2,09	0,65	1,47
3. Навоз, 30 + N <sub>320</sub> P <sub>310</sub> K <sub>532</sub>	6	2,18	2,28	0,54	1,33
4. Навоз, 32 + солома, 8 + N <sub>259</sub> P <sub>249</sub> K <sub>414</sub>	16	2,13	2,27	0,70	1,08
5. Навоз, 62 + солома, 8 + сидерат 24 + N <sub>124</sub> P <sub>174</sub> K <sub>218</sub>	25	2,12	2,35	0,77	1,52
Севооборот 2					
1. Без удобрений	–	2,25	2,06	0,66	0,69
2. N <sub>685</sub> P <sub>412</sub> K <sub>750</sub> на планируемый урожай	–	2,14	2,07	0,68	0,81
3. Навоз, 30 + N <sub>556</sub> P <sub>348</sub> K <sub>576</sub>	6	2,23	2,18	0,67	0,96
4. Навоз, 38 + солома, 8 + N <sub>510</sub> P <sub>309</sub> K <sub>464</sub>	16	2,16	2,21	0,65	0,81
5. Навоз, 72 + солома, 8 + сидерат 23 + N <sub>384</sub> P <sub>237</sub> K <sub>286</sub>	27	2,24	2,26	0,45	1,00

*Примечание.* Содержание органического вещества в навозе – 18,2%, соломе – 93%, в сидерате (горчице) – 11,6%.

Если гумус является интегральным показателем плодородия почвы, источником биогенных элементов, улучшателем физико-химических и иных ее свойств, активатором биологической активности, то удобрения, повышающие содержание гумуса, также выполняют важные экологические функции.

В настоящее время во всех регионах России наблюдается резко отрицательный баланс питательных веществ в системе почва–растение, что негативно сказывается на урожайности и качестве продукции всех сельскохозяйственных культур: зерновых, кормовых, технических и овощных.

Нарушение баланса питательных веществ в земледелии ведет к ухудшению химического состава почвы, природных вод и растений, что отрицательно сказывается на питательной ценности продукции и может привести к функциональным заболеваниям человека и животных. Известны, например, болезни, связанные с недостатком иода (эндемический зоб), фтора (кариес зубов), а также с избытком фтора (флюороз), стронция (уровская болезнь), молибдена (подагра) и т.д. [Перельман, 1975].

По мнению В.В. Ковальского, атеросклерозу содействует повышенное содержание в крови марганца и пониженное – никеля и меди, при ишемической

болезни сердца находят пониженное содержание в крови цинка, а при гипертоническом кризе – в сыворотке крови избыток меди и недостаток кобальта и цинка, сахарный диабет сопровождается падением в крови концентрации марганца. В.В. Ковальский ввел понятие пороговой концентрации элементов в среде, выше или ниже которых наблюдается определенная биологическая реакция (в том числе и заболевания).

Роль агрохимии состоит в том, чтобы оптимизировать в почве и растениях содержание макро- и микробиогенных элементов.

Несомненна важная роль агрохимии в создании оптимальных культурных агрогеохимических ландшафтов для различных природных районов в соответствии с их специализацией.

А.Н. Перельман [1975] отмечал, что, применяя минеральные удобрения, минеральную подкормку домашних животных, осушая болота, мобилизуя внутренние ресурсы ландшафта, человек обеспечивает растения и домашних животных необходимыми элементами, т.е. создает культурный ландшафт с оптимальным геохимическим режимом – такой ландшафт является наилучшим в гигиеническом отношении и отвечает оптимальным условиям для жизни человечества.

Когда говорят о геохимическом ландшафте [по Польшину 1944; 1946], то имеют в виду не только взаимосвязь химического состава отдельных звеньев ландшафта: почвы, растительности, поверхностных и грунтовых вод и т.д., но и их миграционную способность, а также факторы, оказывающие существенное влияние на миграцию химических элементов.

В.И. Вернадский [1934], считал, что источниками подвижности химических элементов в биосфере является живое вещество и природные воды, т.е. синтез и минерализация органических соединений – процессы, соответствующие круговороту химических, особенно биогенных элементов в системе почва–растение.

Систематическое применение агрохимических средств по существу изменяет химический состав почвы, растений, грунтовых вод и т.д., а следовательно, и круговорот веществ в данном ландшафте. Это влияние может быть позитивным и негативным. Зная оптимальные параметры химического состава звеньев агроландшафта, научно обоснованным применением агрохимических средств можно существенно его улучшить. В данном случае, в развитии понятия о ландшафте Б.Б. Польшина, оно по существу приобретает новое агрогеохимическое содержание. В этом суть одной из важнейших экологических функций агрохимии.

Возрастающее загрязнение окружающей среды, особенно агроэкосистем, тяжелыми металлами представляет серьезную угрозу. Их динамическая аккумуляция в педосфере, а затем и в культурных растениях, может привести к накоплению тяжелых металлов в продуктах питания выше допустимой предельной концентрации, что небезопасно для здоровья человека.

Всестороннее исследование данной проблемы позволяет заключить, что агрохимия имеет большие потенциальные возможности по инактивации подвижных форм тяжелых металлов в почве и существенному снижению поступления их в растения. Например, снижение кислотности почв путем известкования, применения органических удобрений, оптимизации доз и соотношений макроэлементов, вносимых с минеральными удобрениями, применение микроэлементов и других агрохимических средств и приемов снижают поступление токсичных тяжелых металлов в растения в несколько раз. По существу эти агрохимические средства позволяют на загрязненных тяжелыми металлами почвах получать экологически безопасную продукцию растениеводства.

В наших исследованиях, выполненных в длительном стационарном опыте, система органических и минеральных удобрений в сочетании с периодическим известкованием снизила содержание подвижного кадмия в пахотном слое почвы в два раза, а свинца в четыре раза. В растениях вики в этих вариантах содержание кадмия было в 3,5 раза, а свинца в два раза меньше чем в контроле. Следовательно, агрохимические средства, ингибируя процессы поступления тяжелых металлов в культурные растения, усиливают экологические функции всей агроэкосистемы.

Особое значение приобретают проблемы улучшения радиоэкологической ситуации в агроэкосистеме. Хорошо известна опасность загрязнения природной среды радиоактивными элементами. Загрязнение такого характера может быть обусловлено различными источниками:

- глобальное распределение продуктов испытания ядерного оружия, в том числе и в мирных целях;
- плановые и аварийные выбросы радиоактивных веществ в окружающую среду от предприятий атомной промышленности;
- выбросы в атмосферу и сбросы в водные системы радиоактивных веществ с действующих АЭС в процессе нормальной их эксплуатации;
- привнесенной радиоактивностью (твердые радиоактивные отходы и радиоактивные источники).

В агроэкосистеме происходят сложные процессы взаимовлияния радионуклидов, как и тяжелых металлов, с биогенными макро- и микроэлементами. Нарастают процессы их кумуляции, трансформации элементов в почве, мобилизации и иммобилизации, миграции по профилю почвы, антагонизма и синергизма с биогенными элементами при транслокации в растения. Радионуклиды в трофической цепи производят серьезное негативное воздействие, в том числе и на организм человека.

Известные атомные трагедии (Челябинская, Чернобыльская) вызвали необходимость проведения глубоких и масштабных исследований и, прежде всего, разработки путей снижения поступления радионуклидов в трофическую цепь в агроэкосистемах.

Среди наиболее существенных факторов и условий иммобилизации радиоактивных элементов в почве и снижение их поступления в растения является использование агрохимических средств. Так, оптимальное питание растений калием и другими питательными элементами снижает загрязнение урожая радионуклидами в два-три раза, известкование кислых черноземных почв дозой извести 0,5–1 г.к. снижает концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растениях в два-три раза. Такой же эффект по цезию установлен при применении фосфатных и калийных удобрений в дозе 60–90 кг/га. Применение же системы органических и минеральных ( $\text{N}_{80}\text{P}_{80}\text{K}_{80}$ ) удобрений в сочетании с известкованием на кислых серых лесных почвах снизило поступление  $^{137}\text{Cs}$  в урожай в 3,5 раза на лесных супесчаных почвах. Причем, доломитная мука была в два раза эффективнее  $\text{CaCO}_3$  [Алексахин и др., 1993]. Ратников и др. [1997] отмечают, что положительное применение органических удобрений и повышенных доз фосфорных и калийных удобрений на уменьшение перехода  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения особенно проявляется на дерново-подзолистых торфяных почвах, а также легкого гранулометрического состава. На этих почвах, например, внесение извести, навоза (более 40 т/га), двойной дозы фосфорных и калийных удобрений снижает поступление  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственные культуры в 2,5–3 раза.

Аналогичные данные получены и другими исследователями. Так, Прищеп и др. [1997] указывают на снижение поступления  $^{137}\text{Cs}$  в зерно овса от

Таблица 81

**Влияние минеральных удобрений на азотофиксирующую способность многолетних бобовых трав**

Культура	Уровень удобрения	Травы первого года пользования (ср. 1979–1981 гг.)				Травы второго года пользования (ср. 1980–1982 гг.)			
		Урожай, ц/га	Масса растит. остат., 0–50 см, ц/га	Кол-во фиксир. азота, кг/га	Коэфф. азотфиксац.	Урожай, ц/га	Масса растит. остат., 0–50 см, ц/га	Кол-во фиксир. азота, кг/га	Коэфф. азотфиксац.
Клевер	Без удобрений	52,4	48,7	96,2	0,77	58,5	66,3	106,5	0,67
	D <sub>150</sub>	72,7	47,3	151,6	0,81	70,4	64,1	161,8	0,79
	D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	71,7	53,2	156,5	0,82	68,0	70,5	158,6	0,78
	N <sub>60</sub> D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	74,2	51,7	116,0	0,67	68,4	60,9	91,5	0,44
	N <sub>120</sub> D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	76,7	54,6	102,7	0,48	73,6	61,9	38,7	0,18
Люцерна	Без удобрений	52,9	54,0	99,9	0,77	80,3	68,6	206,6	0,76
	D <sub>150</sub>	66,2	50,3	148,5	0,82	102,3	67,6	286,8	0,86
	D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	64,8	55,2	148,6	0,82	102,4	75,7	268,4	0,86
	N <sub>60</sub> D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	69,0	56,6	127,4	0,67	106,0	70,2	208,7	0,64
	N <sub>120</sub> D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	78,7	62,5	119,0	0,55	105,4	70,8	133,5	0,41
Эспарцет	Без удобрений	39,6	34,9	136,1	0,82	89,3	49,0	177,6	0,76
	D <sub>150</sub>	35,8	39,5	121,9	0,79	89,1	50,9	205,0	0,80
	D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	36,7	39,5	138,8	0,80	90,0	55,8	195,5	0,80
	N <sub>60</sub> D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	41,4	40,5	114,4	0,65	89,1	49,5	123,7	0,45
	N <sub>120</sub> D <sub>150</sub> K <sub>150</sub>	45,5	43,3	92,8	0,50	98,5	46,0	89,9	0,34
НСР <sub>0,5</sub>	4,5–9,7	5,5	18,4	0,04	6,8–14,7	6,3	25,8	0,08	

применения калийных удобрений более чем в три раза. Причем степень загрязнения его находилась в обратной зависимости от доз калийных удобрений и содержания обменного калия в пахотном слое почвы, а в зерне ржи минеральные удобрения совместно с навозом снижали содержание <sup>137</sup>Cs в 3,5 раза. Все это лишь подчеркивает важную функциональную роль агрохимии в решении проблем радиэкологии. Аккумуляция ТМ и РН в агроэкосистемах требуют развития фундаментальных исследований во всей трофической цепи. Нуждается в совершенствовании теория питания растений с учетом генотипов и возрастающего техногенного загрязнения биосферы, особенно, если учесть, что все эти элементы могут поступать в растения как корневым, так и не корневым путем.

Стратегия использования агрохимических средств в земледелии тесно взаимосвязана с биологическими показателями агроэкосистемы. Влияние агрохимических средств на биоту конкретного агроценоза весьма многогранна, но его можно разделить на две части:

1. Непосредственное воздействие на агроценоз, т.е. на биологические процессы, обеспечивающие питание растений биогенными элементами: симбиотическая и ассоциативная азотфиксация, регулирование фосфорного питания растений за счет использования визиккулярно-арбускулярной микори-

**Структура сообщества целлюлозоразрушающих в зависимости  
от внесения средств химизации, % к общей численности**

Вариант опыта с озимой пшеницей (2-я культура, 5-я ротация)	Бактерии	Актиномицеты	Грибы
Органо-минеральная система: за севооборот – 60 т/га навоза + N <sub>390</sub> D <sub>300</sub> Ê <sub>455</sub>			
N <sub>120</sub> D <sub>50</sub> Ê <sub>150</sub> (фон)	70	17	13
Фон + гербициды (2,4 ДА, симазин)	54	33	17
Фон + гербициды + ретарданты (тур)	50	25	20
Фон + гербициды + ретарданты + фунгициды (фундазол, тилт)	52	33	14
Минеральная система: за севооборот – N <sub>690</sub> D <sub>450</sub> Ê <sub>815</sub>			
N <sub>150</sub> D <sub>60</sub> Ê <sub>160</sub> (фон)	93	4	2
Фон + гербициды (2,4 ДА, симазин)	87	4	8
Фон + гербициды + ретарданты (тур)	60	22	15
Фон + гербициды + ретарданты + фунгициды (фундазол, тилт)	50	28	22
<i>Примечание.</i> Севооборот: вико-овес, озимая пшеница, картофель, ячмень с подсевом клевера, клевер, озимая пшеница.			

зы – ВАМ-гриба и др., а также общая биологическая, в том числе ферментативная активность почвы, как интегральный показатель биологических свойств почвы.

2. Действие агрохимических средств косвенно – т.е. опосредованно, через изменение условий роста и развития растений и структуры микробсообщества почвы.

О влиянии минеральных удобрений на азотфиксирующую способность многолетних бобовых трав можно судить по данным табл. 81 [Азаров, 1995].

Если фосфатно-калийные удобрения положительно влияют на азотфиксацию многолетних бобовых трав, то азотные удобрения вносить под эти культуры нецелесообразно, так как они подавляют симбиотическую азотфиксацию. При этом коэффициент азотфиксации резко сокращается, уменьшаются размеры вовлечения атмосферного азота в биологический круговорот.

Что касается симбиотрофного питания растений фосфором при использовании ВАМ-грибов, то исследования показали, что микоризация не только способствует лучшему усвоению фосфора из субстрата, но и повышает уровень использования этого элемента из применяемых в практике удобрений.

Дополнительное поглощение анионов фосфорной кислоты микотрофными растениями приводит к увеличению поглощения азота, что связано с явлением синергизма, растения клевера под влиянием микоризации лучше перезимовали, а микоризованная пшеница практически не болела корневой гнилью. Интенсивность болезни у зараженных патогенами растений пшеницы снижалась с 90 до 12–14% [Дурынина и др., 1993]. Нельзя не отметить, что многоплановое воздействие ВАМ-грибов на выращиваемые сельскохозяйственные культуры пока еще недостаточно изучено.

Нами установлено, что разные виды удобрений и химические мелиоранты опосредованно влияют на продуктивность растений в агроценозе, повышая их устойчивость к грибным патогенам, изменяя инфекционный потенциал почвы (гельминтоспориоз зерновых, склеротиния подсолнечника и др.).



Таблица 83

**Общая и биологическая токсичность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы при применении минеральных удобрений в севообороте (в % к контролю – без внесения удобрений)\***

Доза удобрений	Общая токсичность	Биологическая токсичность	Микроорганизмы	
			Актиномицеты в тыс./г	Сапротрофные грибы в тыс./г
Без удобрений	0	0	1400	20
N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	5	5	2330	29
N <sub>180</sub> P <sub>180</sub> K <sub>180</sub>	41	28	4220	51

\* Стационарный опыт заложен в 1979 г. (Смоленский филиал ВИУА).

Таблица 84

**Шкала токсичности пестицидов по биотесту при возделывании сельскохозяйственных культур (в % к контролю – без применения препаратов)**

	Количество проанализированных образцов	Количество токсичных образцов	Уровень токсичности, в %	Количество токсичных образцов, в %	Средняя токсичность одного образца, в %
Почва	52	44	1–19	84	9
		8	20–40	16	25
Корни	32	24	20–40	74	36
		8	41–60	26	47
Клубни и корнеплоды	51	30	20–40	56	37
		15	40–60	30	48
		6	61–80	13	82

*Примечание.* 1–19 – низкая токсичность, 20–40 – средняя токсичность, 41–60 – высокая токсичность, 61 и выше – очень высокая токсичность.

Фитозащитный эффект зависит от видов и форм удобрений, физико-химических и биологических свойств почвы. Выявлены культуры с активным ингибирующим воздействием корневых экссудатов на репродуктивную способность фитопатогенов. Это еще раз подтверждает важность создания научно обоснованного севооборота.

Развивается исследование также по новому эколого-биологическому направлению в агрохимии – влиянию систематического применения комплекса средств и пестицидов на токсичность почв и аккумуляцию токсинов в культурных растениях. Используется метод биотеста. Причем изучается возможная токсичность почвы непосредственно от применяемых химических средств и опосредованно – через изменение структуры микробиоценоза почвы.

Исследования показали, что систематическое использование в севообороте системы удобрений и пестицидов негативно влияет на структуру микробиоценоза почвы, повышая в нем относительное количество актиномицетов и сапротрофных грибов, большинство из которых, выделяя токсины, существенно усиливают токсичность почвы и растений (табл. 82) [Коваленко, 1988].

Одни минеральные удобрения в основном действуют опосредованно, через изменение структуры микробоценоза почвы (табл. 83) [Минеев и др., 1985].

Эти данные показывают, что одни минеральные удобрения слабо влияют на токсичность почвы. Она в основном определяется токсинами, выделяемыми актиномицетами и сапротрофными грибами, количество которых под влиянием особенно высоких доз минеральных удобрений резко возрастало. Аналогичная закономерность в той или иной степени имеет место на всех исследуемых почвах.

Большое число опытов с пестицидами, анализы многочисленных образцов почвы, корней, клубней и корнеплодов позволили разработать примерную шкалу токсичности пестицидов по биотесту при возделывании сельскохозяйственных культур (табл. 84).

Как видим, экологические аспекты, связанные с использованием агрохимических средств в земледелии, сложны и многообразны. Возникает необходимость интеграции исследований учеными разных отраслей науки, координации общих усилий в решении экологических проблем в земледелии, количество которых несомненно будет возрастать в связи с необходимостью повышения продуктивности агроценозов на основе внедрения достижений научно-технического прогресса.

## Глава 5

### МЕЛИОРАЦИЯ ПОЧВ КАК ЭЛЕМЕНТ РАЦИОНАЛЬНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ИХ ЗАЩИТЫ ОТ ДЕГРАДАЦИИ

Почвы – неперемное условие существования человеческого сообщества. Их сохранение гарантирует стабильность этого сообщества и его гармоничное развитие. Однако на земном шаре практически повсеместно происходит систематическое абсолютное и относительное уменьшение площади почв, находящихся в сельскохозяйственном использовании.

**А б с о л ю т н о е** уменьшение площади плодородных почв связано с урбанизацией общества, ростом городов, населенных пунктов, дорожных коммуникаций, развитием горной индустрии, строительством аэродромов, отчуждением земель в связи с развитием гидроэнергетики и многими другими объективными и непрерывно действующими причинами. По данным ООН ежегодное отчуждение земель сельскохозяйственного пользования в целом в мире составляет 6–7 млн га.

**О т н о с и т е л ь н о е** уменьшение площади почв, находящихся в сельскохозяйственном использовании, обусловлено демографическими факторами. Каждую неделю население земного шара увеличивается на 1 млн 250 тыс. человек. Рост населения обуславливает резкое снижение площади пашен и других угодий, приходящихся на одного человека. Увеличение численности населения определяет необходимость непрерывного роста производства продовольствия и сельскохозяйственного сырья для промышленности. Это противоречие (сокращения площади почв в сельскохозяйственном пользовании, с одной стороны, и непрерывно растущая потребность в продовольствии и сырье – с другой) может быть разрешено **только** в результате резкого повышения плодородия почв, уве-

личения выхода продукции с единицы площади. Последнее возможно при внедрении в агрономическую практику достижений селекции, химизации, механизации, электрофикации земледелия. Как бы, однако, совершенны ни были эти приемы, они окажутся малоэффективными или непригодными до тех пор, пока почвам не будут приданы благоприятные свойства для роста и развития сельскохозяйственных и лесных культур. Необходимы также и вторичные, более благоприятные (или оптимальные) по сравнению с естественными (исходными), водный, тепловой и солевой режимы. В этой связи важно прежде всего подчеркнуть, что мелиорация (от лат. melio – улучшать) – это с и с т е м а мероприятий по улучшению свойств и режима почв в благоприятном производственном (сельскохозяйственном, лесохозяйственном и др.) и экологическом направлениях. Мелиорация обеспечивает создание важнейших условий для получения высоких и устойчивых урожаев, совершенствует производство, качественно меняет условия и производительность труда. Мелиорация представляет собой лишь часть сложного комплекса мероприятий, направленных на оптимизацию процесса сельскохозяйственного и лесохозяйственного производств, общего подъема продуктивности почв. Ее эффект в полной мере проявляется только на фоне высокой культуры земледелия и лесного хозяйства. При низком уровне агрономического производства эффективность целесообразно построенных мелиоративных систем может оказаться весьма незначительной, а затраты на их строительство не оправданными вообще.

Вся история человечества показывает, что в условиях гумидного и аридного климата мелиорация почв всегда оказывалась необходимой не только для развития и стабилизации сельского хозяйства, но и для существования человека. Об этом свидетельствуют древние оросительные системы в долинах Нила, Тигра и Евфрата, Амударьи и Сырдарьи, на огромной территории Юго-Восточной Азии, в Мексике, а также осушенные в средние века монастырские и крестьянские земли Северо-Западной Европы и т.д. Классический пример такого рода – массовое применение закрытого гончарного дренажа для осушения заболоченных почв в середине XIX в. в Англии. После изобретения в 1843 г. трубчатого дренажа в этой стране всего за 27 лет к 1873 г. было осушено свыше 4 млн га земель, что позволило Англии в те годы активно потеснить своего главного конкурента – Россию на хлебном рынке Европы. Рекордные современные урожаи зерновых (до 80–100 ц/га) на севере ФРГ, во Франции, Нидерландах и других странах Западной Европы получают, в частности, на дренированных псевдоглях.

Значение комплексной мелиорации для сельского хозяйства нашей страны впервые было раскрыто в конце прошлого века основоположником научного почвоведения В.В. Докучаевым. В 1898 г. он писал: "... в тайге среди подзолов минерализация (химизация) почв и дренаж, можно сказать, – центр тяжести всего сельского хозяйства". По В.В. Докучаеву степная зона – территория, где земледелие должно быть направлено на сохранение благоприятных свойств черноземов и улучшение их водного режима с помощью агрономических и агро-мелиоративных мероприятий, гидро- и фитомелиораций. В северных районах распространения черноземов орошение ограничивается поливом кормовых культур, садов. В сухой степи, полуаридной и аридной зонах по В.В. Докучаеву, земледелие невозможно без ирригации. Таким образом, необходимость мелиорации почв предопределена, прежде всего, природными особенностями страны.

Сегодня система знаний и практики, получившие общее название – мелиорация, стала не только актуальной составной частью земледелия, но и лесного, водного хозяйств, рекреационного строительства, охраны окружающей среды.

Поэтому следует признать, что мелиорация почв является обязательным элементом землепользования вообще и земледелия, в частности. Ее эффект тем выше, чем выше общий уровень земледелия, состояние культуры и производства общества. И наоборот, чем ниже уровень земледелия, тем менее эффективны мелиоративные мероприятия.

Выше мы обратили внимание на то, что уровень развития мелиорации почв почти повсеместно служит важнейшим показателем культуры, доходности и экологической защищенности сельского хозяйства. Объективная оценка роли мелиорации приобретает особое значение при многообразии современных форм аграрного производства. Поэтому попытаемся сформулировать современную концепцию ее применения.

Очевидно, в этой концепции, в известной мере, должны быть пересмотрены подходы, которые были детерминированы предшествующими социально-экономическими условиями. Необходимость пересмотра ряда принципиальных положений теории и практики мелиорации почв и разработки новой концепции определяется следующими обстоятельствами:

- изменением *социальных* условий, в результате чего мелиорация почв оказывается эффективной только при безусловной экономической заинтересованности землепользователя;

- новым *целевым* подходом к реализации мелиоративных мероприятий. Их эффективность теперь должна оцениваться не только уровнем урожая, но и поддержанием благоприятных экологических условий для человека и агроландшафта, рациональной системой защиты окружающей среды;

- необходимостью выбора способов мелиорации, адекватных объекту мелиорации, т.е. почвам мелиорируемой территории с всесторонним анализом их генезиса, свойств и режимов;

- актуальностью учета не только первичных, но и *вторичных почвообразовательных процессов*, возникающих при активном антропогенном воздействии на почвенный покров при его мелиорации. Очевидно, мелиорация должна быть безопасной для природы и человека.

Под экологически безопасной мелиорацией мы понимаем систему мероприятий, направленных на оптимизацию свойств и режимов почв в целях воспроизводства и роста их плодородия, создание экологически равновесных динамических условий функционирования ландшафта и поддержание (или формирование) благоприятной обстановки для существования человека.

Основными положениями этой экологической концепции мелиорации почв являются:

- 1) ландшафтно-экологический принцип оценки объектов мелиорации, использования и охраны водно-земельных ресурсов;

- 2) комплексное применение агрономических, агро-мелиоративных, инженерно-мелиоративных, лесомелиоративных и других мероприятий;

- 3) социально-экономическая заинтересованность землепользователей в эффективном использовании мелиорированных почв, сохранении и повышении их плодородия, защите окружающей среды;

- 4) применение эколого-генетического подхода к проектированию мелиоративных систем. Это значит, что мелиоративные и агрономические мероприятия, направленные на улучшение почв, должны быть адекватны свойствам и генезису почв и почвообразующих пород, природно-климатическим и геохимическим условиям.

Такой подход должен предусматривать разработку комплекса мероприятий по экологической защите как отдельных компонентов ландшафта, так и агро-

ландшафтов в целом. Поэтому при разработке мелиоративных мероприятий должны быть решены вопросы по охране водно-земельных ресурсов, улучшению качества поливных вод, сокращению объема дренажного стока и его утилизации, исключающей поступление неочищенных вод в естественные водотоки и водоемы. Мелиоративные мероприятия должны быть увязаны также с работами сельскохозяйственного цикла, выполняемыми на мелиорируемых землях, т.е. с системами севооборотов, обработки почв, внесения удобрений при высоком уровне их выполнения. Мелиорация почв, в принципе не может быть эффективной в условиях низкой культуры земледелия. В таких условиях ее вообще не следует применять.

Мелиорация почв как важнейший элемент землепользования и неотъемлемая часть земледелия оказывает глубокое влияние на современные процессы почвообразования. Она определяет вторичную эволюцию почв, их устойчивость в условиях сельскохозяйственного производства. С ней связаны опасные изменения всех элементов природной среды. Целесообразность применения мелиоративных мероприятий и прогноз их последствий в значительной мере определяется полнотой изученности свойств и режимов почв в естественном и вторичном состояниях.

Однако эта проблема для условий России раскрыта весьма неполно. Вместе с тем, в обозримой перспективе страна окажется перед необходимостью интенсивного развития мелиорации. Последнее подтверждает интернациональный опыт. Страны, сегодня реально решившие свои продовольственные проблемы, располагают огромными фондами мелиорированных земель. Так, в США, Германии, Голландии они составляют соответственно 60, 50 и 85% от площади сельскохозяйственных угодий. Независимо от погоды, таким образом, 50% и более площадей аграрного производства этих стран имеют гарантированные благоприятные условия для формирования урожая. В России площадь осушаемых и орошаемых земель в настоящее время составляет немногим более 5% при явной тенденции к их сокращению. Поэтому здесь земледелие не стабильно. Попытки увеличить площадь мелиорированных земель в стране пока не увенчались успехом. Кроме социальных условий в значительной мере причиной такого состояния оказалось и незнание вторичных почвообразовательных процессов в мелиорированных почвах ландшафтов.

В целом, проблема трансформации процессов почвообразования под влиянием мелиоративных мероприятий развивалась в последние десятилетия весьма неравномерно. Определенное внимание было уделено почвам сухих степей и пустынь, в частности, засоленным почвам и вторичным процессам, протекающим при ирригации минерализованными водами. Значительно слабее исследовано вторичное почвообразование при мелиорации почв гумидных ландшафтов, вероятность деградации почв при их орошении неминерализованными (слабоминерализованными) водами.

Вместе с тем, накопленные нами данные, а также материалы других авторов, позволяют раскрыть ряд важных закономерностей вторичных изменений в таких почвах после их мелиорации, оценить вероятные деградационные явления после антропогенного воздействия и определить систему защитных мероприятий.

Дренаж, ирригация, глубокое рыхление, кротование и другие виды гидротехнических и агро-мелиоративных мероприятий прежде всего оказывают влияние на водный режим почв. С изменением водного режима начинается глубокая трансформация первичных почвообразовательных процессов. Ниже на примере ряда типичных для России и других стран условий рассматриваются

несколько актуальных ситуаций связанных с деградационными изменениями минеральных и органических почв в результате трансформации их гидротермического режима после применения различных агро- и гидромелиоративных мероприятий.

### **Деградационные изменения минеральных почв при глееобразовании на фоне застойно-промывного водного режима**

В лесной зоне России основным объектом осушения являются минеральные почвы разной степени заболоченности. Они занимают от 75 до 90% сельскохозяйственных земель, использование которых возможно после дренажа. Все эти почвы в естественных условиях формируются под воздействием процесса глееобразования. Значительные площади таких почв образуются в условиях постоянного или весьма длительного застойного (субаквального) водного режима. К этой группе относятся, преимущественно, болотно-подзолистые глеевые, дерново-глеевые, торфянисто-глеевые и другие почвы.

В этой связи особое значение приобретает оценка влияния процесса глееобразования на формирование почв в постмелиоративный период. Это влияние оказывается весьма неоднозначным в условиях застойно-промывного и застойного водного режима. На фоне застойного режима наблюдается миграция железа и марганца к зонам аэрации и их элювирование за пределы профиля, увеличение удельной поверхности и сине-голубая окраска горизонтов (табл. 85). Однако в целом химические свойства почв не претерпевают глубоких изменений. Принципиально иная картина имеет место в условиях застойно-промывного режима после ввода в действие дренажа. В этом случае на фоне застойно-промывного водного режима следствием глееобразования, как показали наши модельные и натурные исследования на кислых и выщелоченных почвообразующих породах, является резкое снижение рН, уменьшение содержания поглощенных кальция и магния, общего железа, алюминия, марганца, илстой фракции, относительное увеличение кремнезема, подвижного алюминия, гидролитической кислотности и существенное снижение степени насыщенности основаниями, возникновение светлой (белой, светло-серой) окраски поверхностных горизонтов. Таким образом, трансформация застойного (или длительно-застойного) водного режима в застойно-промывной (или возникновение застойно-промывного режима в результате орошения и других причин) – причина глубоких деградационных изменений, усиления или появления вновь признаков подзолообразования. С этим связано фиксируемое нами и другими авторами возникновение (или увеличение) мощности подзолистых горизонтов после осушения глеевых почв. Этот основной процесс получает максимальное проявление при низком уровне агротехники (т.е. при отсутствии травопольных севооборотов, систематического известкования, макро- и микроудобрений, органических удобрений), а также при невыполнении агро-мелиоративных мероприятий по ускорению поверхностного и внутрипочвенного стока.

Механизм глееобразования в условиях застойно-промывного водного режима является причиной возможной деградации не только осушаемых заболоченных минеральных почв, но и орошаемых автоморфных почв (например, черноземов, каштановых и др.). В результате их систематических переполивов при орошении дождеванием и, особенно, при поверхностном поливе в Поволжье, Заволжье, на Венгерской низменности и в других регионах черноземные и тем-

**Изменения свойств почв и процессов под влиянием глееобразования  
при застойном и застойно-промывном типах водного режима  
[по материалам модельных и натуральных исследований]**

Свойства почв и процессы	Изменения в результате глееобразования на фоне водного режима*	
	застойного	застойно-промывного
Вынос Fe	Умеренный	Интенсивный
Вынос Al	Не выражен	Интенсивный
Вынос Ca и Mg	Не выражен или слабый	Интенсивный
pH	Без изменений или слабое подщелачивание	Резкое подкисление (на 1–2 ед. pH)
Подвижный Al	Без изменений	Резкое увеличение (на 1–2 порядка)
Гидролитическая кислотность	Без изменений	Резкое увеличение (в 2–3 раза)
Степень насыщенности основаниями	Несущественные изменения	Резкое уменьшение (в 3–4 раза)
Содержание ила (частицы < 0,001 мм)	Несущественные изменения	Интенсивный вынос (лессиваж)
Внешняя удельная поверхность	Слабое или заметное увеличение	Уменьшение
Сегрегация железа (конкрецирование)	Не выражена	Заметная или интенсивная
Цвет горизонта	Сизый, синеватый, голубовато-зеленый	Белесый, яркobelый, серовато-голубой

\* Изменения по сравнению с исходной почвообразующей породой.

нокаштановые почвы оказываются в условиях периодического глееобразования на фоне застойно-промывного водного режима. В этом случае повторяется ситуация, рассмотренная выше для почв лесной зоны. При возникновении пульсирующего анаэробноз и глееобразования, связанных с периодическими переполюсами, поверхностные горизонты черноземов и каштановых почв подкисляются, их органическое вещество приобретает фульватный характер. Это сопровождается выносом железа, кальция, других элементов. Морфологически эти изменения проявляются в осветлении поверхностных горизонтов (их осолодении), потере водопропускной структуры. Почва утрачивает благоприятную водопроницаемость, ее поверхностные слои приобретают свойства водоупоров. Эти процессы определяют возникновение необходимых условий для спонтанного развития глееобразования на фоне застойно-промывного водного режима и глубокой деградации почв.

Деградационные явления, связанные с глееобразованием в условиях застойно-промывного водного режима, можно проследить не только в лесной и степной, но и в других природных зонах Земли. Так, на многих десятках тысяч гектар староорошаемых рисовых систем, приуроченных к нетяжелым и относительно проницаемым ферраллитным кислым породам Вьетнама, Бирмы, других стран Юго-Восточной Азии, формируются "рисовые" подзолы. В результате пульсирующего глееобразования в верхних горизонтах этих почв на протяжении многовекового орошения возникли мощные светлые элювиальные горизонты. Плодородие этих почв настолько низко, что в настоящее время они мо-

**Изменения мелиорированных почв разных зон под влиянием глееобразования на фоне застойно-промывного водного режима**

Природная зона	Почва	Вид мелиоративного воздействия	Основные изменения	Защитные мероприятия
Лесная	Болотно-подзолистые; дерново-глеетые; дерново-глеетые кислые; торфянисто-глеетые	Дренаж	Увеличение мощности или появления подзолистого E (A2) горизонта	Известкование; травопольные севообороты; внесение органических и минеральных макро- и микроудобрений, аэрация
Степная	Черноземы обыкновенные, южные; каштановые почвы	Орошение (при систематических переполивах)	Осолodение; формирование кислых (слабокислых) светлых осолodелых горизонтов	
Тропики	Кислые красноватые почвы на ферраллитных, ферритных и других корках выветривания	Ирригация в условиях многовековой культуры риса	Возникновение "рисовых" подзолов	

гут быть использованы только для возделывания культуры азотфиксирующего арахиса.

Обобщение мирового опыта показывает, что вторичная эволюция почв на фоне застойно-промывного режима непременно завершается формированием профилей со светлыми кислыми элювиальными горизонтами, обладающими низким плодородием. Повышение (восстановление) их плодородия независимо от приуроченности к природно-климатическим зонам Земли (лесной, степной, тропической и др.) всегда связано с необходимостью выполнения одних и тех же (или очень близких по назначению) мелиоративных, агро-мелиоративных и агрономических мероприятий – известкования, травосеяния, устранения причин переувлажнения, внесения макро- и микроудобрений (табл. 86).

**Деградационные изменения минеральных почв при глееобразовании на фоне застойного водного режима**

Мелиоративные мероприятия могут оказаться причиной деградационных изменений почв под влиянием глееобразования и в условиях застойного водного режима. В этом случае не происходит столь резкого изменения химических свойств почв как это имеет место на фоне застойно-промывного водного режима. Кислотность почв, степень насыщенности основаниями, содержание общего алюминия, ила остаются на уровне близком к их исходным значениям.

Явления преимущественно застойного глееобразования возникают обычно при выполнении различных гидро- и агро-мелиораций на тяжелых почвах (например, при глубоком рыхлении почв, в условиях рисосеяния и др.). Наиболее существенные изменения связаны с их обезжелезнением. Следствием обезжелезнения в условиях застойного режима является резкое ухудшение агрегатного состава, водопроницаемости, увеличение удельной поверхности и влагоемко-



**Изменения мелиорированных почв разных зон под влиянием глееобразования на фоне застойного водного режима**

Природная зона	Почва	Вид мелиоративного воздействия	Основные изменения	Защитные мероприятия
Лесная	Почвы разного генезиса и состава	Подтопление в верхнем бьефе водохранилищ	Интенсивное оглеение профиля	Дренаж
	Тяжелые слабооглеенные почвы разного генезиса	Глубокое мелиоративное рыхление	Оглеение профиля	То же
Степная	Почвы разного генезиса и состава	Подтопление в верхнем бьефе водохранилищ	Интенсивное оглеение профиля; возможно засоление и осолонцевание	Дренаж; выборочно рассолонение и рассолонцевание
	Черноземы суглинистые и глинистые	Подъем грунтовых вод в результате естественного и антропогенного переувлажнения	То же; слитизация	То же; уплотнение
	Черноземы, каштановые, преимущественно тяжелого состава	Ирригация риса	Интенсивное оглеение; слитизация	Дренаж; уплотнение
Тропики	Почвы разного генезиса на ферралитных, ферритных и других корках выветривания	Ирригация риса	Интенсивное оглеение; слитизация	То же

сти, развитие слитизации. Так, после глубокого мелиоративного рыхления слаботаболоченных недренированных почв в их профиле аккумулируются и удерживаются как в своеобразном "гидрологическом мешке" воды поверхностного склонового стока. После рыхления слаботаболоченные почвы переходят в категорию постоянно переувлажненных, их водный режим становится близким к застойному, свойственному перегнойно-глеевым (и более заболоченным) почвам. Очевидно, в такой гидрологической обстановке практически невозможно земледелие. При этом происходит дезагрегирование почв, их уплотнение и резкое падение водопроницаемости.

На тяжелых почвах с низкой фильтрацией и водоупорными горизонтами в условиях орошения риса происходят близкие изменения. Профиль почвы подвергается умеренному обезжелезнению, происходит деструкция агрегатов и существенное падение водопроницаемости. Кроме того, в почвенном растворе резко возрастает концентрация токсичных ионов закиси железа и марганца. Поэтому восстановление плодородия таких почв возможно только после интенсивного дренажа (табл. 87).

## Деградационное влияние на торфяные почвы глубокого осушения и различных видов пескования

В условиях Нечерноземной зоны наименее стабильными к антропогенному воздействию являются осушенные торфяные почвы. В этом случае дренаж принципиально меняет направленность почвообразования. Сущность болотообразования заключается в консервации и аккумуляции остатков органического вещества растений-торфообразователей. В естественном состоянии происходит непрерывный подъем поверхности болот со скоростью 1–2 мм/год. Процесс аккумуляции органического вещества прекращается после осушения. Наступает новая фаза эволюции торфяных почв.

В 1960 г. для ускоренного и, казалось бы, экономически целесообразного осушения торфяных почв был предложен способ дренажа, основанный на использовании глубоких каналов, врезаемых в водоносный песок. По замыслу авторов этот способ, получивший название “самотечного глубокого осушения низинных болот”, рассчитан на отрыв капиллярной каймы от всех слоев торфяной залежи (рис. 36).

Способ был рекомендован для осушения болот полесских ландшафтов, т.е. для условий, когда торфяные почвы подстилаются оглееными водоносными кварцевыми песками. Казалось бы, этот способ обладает очевидными преимуществами. Он экономичен. Глубокие каналы обеспечивают быстрое осушение. В первые годы эксплуатации расходы на поддержание системы – минимальные, а урожай – существенно возрастает. Однако эти преимущества в условиях южной тайги Европейской части страны действуют весьма непродолжительно. Как только глубокие каналы сбрасывают основной запас гравитационной влаги из торфяной залежи (это происходит через три–четыре года после завершения строительства осушительной сети), так немедленно включается механизм ускоренного биохимического разложения органического вещества торфа и его быстрая сработка. Естественный процесс почвообразования, связанный с накоплением органического вещества торфа, в результате самотечного глубокого осушения сменяется его ускоренным распадом (3–4 см/год и более). Кроме биохимического разложения торфа до окислов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ), на осушенных болотных массивах после сброса гравитационной влаги с помощью глубоких каналов начинается активная ветровая эрозия и глубинные пожары. Ускоренное разложение торфа сопровождается поступлением в почвенный раствор, а затем – и в грунтовые воды огромных масс нитратов. Этот несвойственный природным условиям южной тайги процесс сработки торфа быстро завершается полным исчезновением органического вещества торфяных почв. На дневную поверхность выходят оглеенные практически бесплодные кварцевые пески. Формируются глееземы. В Белоруссии, где способ “самотечного глубокого осушения низинных болот” в 1960–1970 гг. получил наиболее широкое распространение, общая площадь таким образом исчезнувших торфяных почв и вновь появившихся вторичных глееземов составила около 200 т/га. Широкое применение этого способа осушения было связано, очевидно, с непониманием вторичных почвообразовательных и деградационных процессов, которые были вызваны к жизни таким способом осушения низинных болот.

При рассмотрении проблем деградации осушенных торфяных и минеральных почв необходимо подчеркнуть особое значение оценки экологического последствия антропогенного влияния не только новых, но и, нередко, традиционных приемов изменения их свойств и режимов.

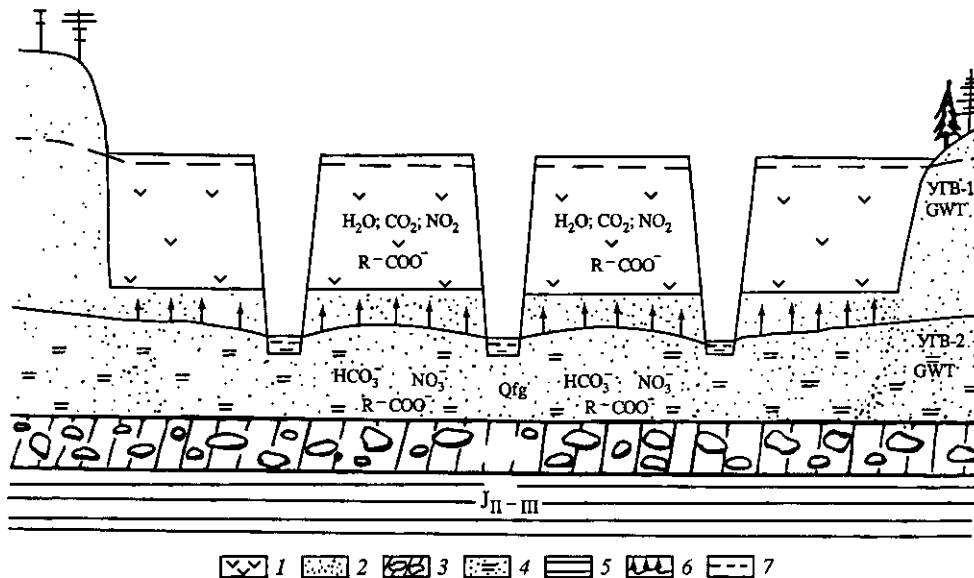


Рис. 36. Схема самотечного глубокого осушения низинных торфяных почв системой каналов  
 1 – торф; 2 – флювиогляциальный песок; 3 – моренный суглинок; 4 – грунтовые воды; 5 – юрские глины; 6 – уровень грунтовых вод и положение капиллярной каймы после осушения; 7 – уровень грунтовых вод перед осушением

Так, в частности, на протяжении более века освоение осушенных торфяных почв осуществляется в условиях песчаных смешанной и покровной культур земледелия. В первом случае на торфяную почву вносят 300–600 м<sup>3</sup>/га песка и перемешивают его с массой пахотного горизонта; во втором – на поверхность торфяной почвы укладывается слой песка мощностью 15–16 см (римпасская культура), который становится пахотным горизонтом. До последнего времени полагали, что эти виды агроулучшения несколько повышают сработку торфа только в пахотном горизонте, где содержание органики невелико, тогда как нижние слои торфа защищают таким образом от ускоренного разложения. Преимущество этих видов пескования очевидно – повышается несущая способность почв и урожай, сокращается угроза дефляции и пожаров, уменьшается отчуждение торфа с полей с урожаем. Абсолютное большинство осушенных торфяных почв в Западной Европе находится в условиях песчаных культур земледелия. Однако исследования, проведенные в последние годы автором и А.П. Шваровым, показали, что внесение песка в пахотный горизонт или на поверхность осушенных торфяных почв резко меняют температурный режим не только гор. Апах, но и всех слоев почвенного профиля. Происходит повышение температуры и снижение общих запасов влаги всего почвенного профиля от дневной поверхности до грунтовых вод. Под опесчаненными горизонтами происходит существенное (на 2–6 °С) повышение температуры почв и (на 1–2 °С) грунтовых вод.

В результате в профиле осушенных торфяных почв со смешанной (пескование) и покровной песчаной культурами происходит не ослабление, а, наоборот, усиление процесса биохимической сработки органического вещества (табл. 88). Сработка торфа под покровом песчаной культуры в условиях южно-таежной подзоны на 25–50% превышает скорость разложения торфа на контроле, т.е. на торфяной почве без песчаного покрытия (черная культура, контроль). Это сво-

**Потери органического вещества (т/га) осушенных торфяных почв  
в условиях полевого опыта  
[Польдер "Макеевский мыс", 1995–1996 гг.]**

Вариант культур					
Черная		Пескование (смешанная)		Покровная	
1995	1996	1995	1996	1994	1996
Слой 0 – 20 см					
21	18	19	39	14	16
Слой 20–50 см					
14	17	27	22	14	16
Слой 50–80 см		Слой 50–85 см		Слой 50–80 см	
13	16	14	18	24	26
Слой 80–90 см					
				6	6
Слой 0–80 см		Слой 0–85 см		Слой 0–95 см	
48	51	60	79	58	64
Потери органического вещества торфа, %					
100	100	125	155	121	125

его рода плата за преимущества, связанные с использованием в земледелии различных приемов пескования. Поэтому при применении пескования и покровной культуры необходимо предусматривать не только дренаж, но и мероприятия, тормозящие и компенсирующие сработку органического вещества торфа – внесение органических удобрений, травосеяние, регулирующее шлюзование (субиригацию), другие приемы защиты торфяных почв.

### Заключение

Изложенное позволяет признать, что мелиорация почв является важнейшим элементом современного земледелия и землепользования. Ее применение может оказаться эффективным, если при проектировании, строительстве и эксплуатации систем руководствуются следующими принципиальными положениями:

1. Все виды мелиораций реализуются комплексно в комбинации как между собой, так и с агрономическими и природоохранными мероприятиями, путем создания совершенных мелиоративных систем. Такие системы позволяют получить не только экономический эффект, но и сохранить благоприятные экологические условия ландшафта, повысить плодородие мелиорированных почв.

2. Мелиорации всех видов реализуются при условии обязательной прямой экономической заинтересованности землепользователя.

3. Мелиорация должна основываться на долгосрочных прогнозах, быть экономически эффективной, социально целесообразной, экологически безопасной, водосберегающей, почво- и природоохранной.

При этом применение каждого нового способа мелиорации почв оправдано только в том случае, если он адекватен природным условиям вообще и, в частности, непосредственному объекту земледелия и мелиорации – почвенному покрову рассматриваемой территории. Следует, однако подчеркнуть, что принцип адекватности должен выдерживаться не только в отношении новых, но и традиционных гидро- и агро-мелиоративных приемов оптимизации свойств и режимов почв. При этом, очевидно, что определение степени соответствия способа мелиорации конкретным природным условиям и, особенно, почвам должно строиться на анализе современных процессов вторичного почвообразования, обусловленных антропогенным влиянием на окружающую среду. Только на этой основе может быть реализовано эффективное земледелие практически во всех природных зонах и исключены опасные вторичные изменения почв связанные с их деградацией.

## *Глава 6*

### **МЕТОДЫ И ПРИЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ И ОПТИМИЗАЦИИ УДОБРЕНИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ**

При регулировании плодородия почвы важно учитывать круговорот веществ в земледелии и воздействовать агрохимическими средствами на химические, физические и биологические процессы в почве и растениях с целью оптимизации питания культурных растений макро- и микроэлементами. Показатели плодородия почвы являются оптимальными в том случае, если они обеспечивают формирование высокого планируемого урожая и качества продукции всех культур севооборота. Они должны соответствовать биологическим требованиям культурных растений. На основе обобщения данных научно-исследовательских учреждений предлагаются следующие параметры основных показателей плодородия разных типов почв (табл. 89).

Оптимизация параметров агрохимических показателей плодородия почвы производится по содержанию гумуса, подвижных форм азота, фосфора, калия, микроэлементов, определяющих эффективное плодородие. Исследованиями в России определены оптимальные показатели содержания гумуса в дерново-подзолистой почве в зависимости от гранулометрического состава: в песчаных – 1,8–2,0%; супесчаных – 2,0–2,5%; суглинистых – 2,6–3,0%. Для поддержания бездефицитного баланса гумуса на этих почвах при данном его содержании необходимо вносить ежегодно 16–18, 13–15 и 10–12 т/га навоза.

Установлена зависимость между содержанием в почве гумуса и урожайностью сельскохозяйственных культур. На супесчаных почвах без внесения минеральных удобрений при увеличении содержания гумуса с 1,0–1,3 до 1,9–2,0% урожайность ячменя возрастала с 14,7 до 21,6 ц/га, на суглинистых – с 21,3 до 27,7 ц/га. На фоне минеральных удобрений урожайность составляла: на супесчаных почвах соответственно 20,3 и 35,6 ц/га, на суглинистых – 28,1–38,2 ц/га. Для поддержания оптимального содержания гумуса в дерново-подзолистых и серых лесных почвах рекомендуется применение органических удобрений сочетать с известкованием, посевом сидеральных культур, ежегодным внесением азотных удобрений, посевом бобовых трав в севообороте.

Таблица 89

## Показатели плодородия разных почв и урожайность сельскохозяйственных культур

Показатель	Тип суглинистых почв			
	Черноземы обыкновенные	Серые, лесные	Дерново-подзолистые	Сероземы типичные
Агрофизические свойства почв				
Пахотный слой, см	35	30	27	35
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,1	1,2	1,25	1,3
Пористость общая, %	59	55	50	46
Влагоемкость, % от массы	30	29	27	25
Водопрочные агрегаты > 0,25 мм, %	60	50	40	25
Агрохимические и физико-химические свойства почв				
Гумус, %	7,0	3,0	2,0	1,3
т/га	270	90	75	60
Азот, %	0,3	0,2	0,15	0,14
т/га	12,0	7,2	5,0	6,3
Фосфор подвижный, мг/100 г	20	20	20	4
Калий обменный, мг/100 г	35	20	15	400
Урожайность, ц/га:				
Пшеница озимая	60	50	45	50
Ячмень		45	32	40
Многолетние травы на сено	120	75	55	120
Картофель		250	250	120
Хлопчатник (хлопок сырец)				45

Таблица 90

## Предельно допустимые параметры орошаемых степных горизонтов Алтайского края

Параметр	Предельно допустимое значение
Мощность гумусового горизонта, А + АВ	Обыкновенные черноземы – 40 см Южные черноземы – 30 см
Содержание гумуса в пахотном горизонте	Не менее 80% от содержания в богарных аналогах
Фракционно-групповой состав гумуса	Не < 70% от суммы ГК и содержания ГК второй фракции в богарных аналогах
рН водной суспензии	5,0–8,0
Состав обменных оснований	Са > 70% Е К, Na < 5%
Равновесная плотность, г/см <sup>3</sup>	для глинистых – 1,30, для супесей – 1,45
Порозность пахотного горизонта	> 50%
Скорость фильтрации	> 50 мм/г
Засоление пахотного горизонта	менее чем слабое
Содержание подвижных элементов	N, P – высокое K – высокое, среднее

Таблица 91

**Диагностические критерии уровней окультуренности черноземов по агрофизическим показателям пахотного слоя**

Уровень окультуренности	Структурно-агрегатный состав, %		Равновесная плотность, г/см <sup>3</sup>	Водопроницаемость, мм/ч (сред. за 6 ч.)	Урожай, ц/га*		
	Воздушно-сухие агрегаты (от 10 до 0,25 мм)	Воздушные агрегаты более 0,25 мм			Озимая пшеница (зерно)	Кукуруза, зерно	Сахарная свекла
Высокий	70–80	45–55	1,1–1,2	60–90	35,5	38,7	320
Средний	60–70	35–45	1,2–1,3	30–60	28,6	33,5	260
Низкий	< 60	< 35	> 1,3	< 30	24,8	26,6	220

\* Усредненные данные, полученные в НИУ и на сортоучастках Украины.

Предельно допустимые параметры ряда важных показателей, характеризующих плодородие степных черноземов Алтайского края представлены в табл. 90 [Самойлова, 1989].

Интенсивное антропогенное воздействие на почвенный покров при реализации технологий в земледелии и процессе окультуривания почвы может существенно изменить ее свойства, определяющие продуктивность сельскохозяйственных культур. Это подтверждают исследования, выполненные в разных земледельческих регионах.

В.В. Медведев [1988] приводит следующие критерии показателей агрофизических свойств пахотного слоя черноземов (табл. 91). Соответственно предлагаются и дифференцированные подходы к использованию пахотных земель, в зависимости от уровня окультуренности почвы.

Так, при высокой окультуренности важно под отдельные культуры отвальную вспашку заменить плоскорезной обработкой, уменьшить число междурядных обработок при посеве пропашных культур, поддерживать бездефицитный баланс гумуса (20–30 т органических удобрений один раз за 4–5 лет). В орошаемом земледелии необходима строго нормативная подача воды, уменьшение давления машино-тракторных агрегатов на почву и др.

При средней окультуренности почвы мероприятия направлены на улучшение агрофизических свойств: повышения доз органических удобрений; введение специализированных севооборотов со значительной долей сплошного сева бобовых культур; использование кальцийсодержащих веществ и т.д.

Использование земель с низкой окультуренностью почвы, кроме перечисленных мероприятий, требуют одноразового внесения за тот же период высоких доз органических удобрений (до 80 т/га). Вполне понятно, что эти вопросы не простые и требуют более углубленных фундаментальных исследований для дальнейшего совершенствования системы мероприятий с целью более дифференцированного подхода не только к реализации потенциальных возможностей агроценоза, но и для сохранения или улучшения свойств и плодородия почв в зависимости от степени их окультуренности и специализации агроценоза.

Это подтверждается многими исследованиями. Например, наиболее интенсивно плодородие почвы используется в овощных и кормовых севооборотах, где культуры для формирования урожая требуют большого количества пита-

тельных элементов. Однако и в этом случае, при правильной системе удобрений можно получать и высокий урожай и сохранять на должном уровне плодородие почвы, на аллювиальных луговых почвах в овощекормовом севообороте (однолетние травы, капуста, морковь, свекла) установлена перспективность следующей системы удобрений: под капусту –  $N_{150-180}P_{80-100}K_{250-300}$ ; под морковь –  $N_{90}P_{60}K_{180}$  и под столовую свеклу –  $N_{120}P_{60}K_{210}$  в сочетании с внесением один раз за ротацию севооборота 50 т/га навоза и запаркой 25–30 т/га зеленой массы горохоовсяной смеси. Урожай составил: капусты белокочанной – 88 т/га, моркови – 72 т/га и столовой свеклы – 59 т/га. Прибавка урожая стандартной продукции за две ротации севооборота составила 54% при высоком ее качестве.

При этом сохранилось оптимальное содержание гумуса в почве (3,5–3,7%), плотность 0–40 см слоя почвы – 1,02 = 1,10 г/см<sup>3</sup>, *повысилась биологическая активность почвы*, снизились непроизводительные потери азота от выщелачивания в грунтовые воды с 8–12% при NPK до 1–2% в варианте NPK + сидераты и навоз [Борисов и др., 1990].

Можно привести и другой пример возможного регулирования свойств на плодородие чернозема путем правильного использования агрохимических средств в кормовом севообороте, интенсивно насыщенном кормовыми культурами [Примак и др., 1989].

Опыт проводили на мощном, маломощном черноземе центральной лесостепной зоны Украины. В стационарном агрохимическом опыте было принято следующее чередование культур в севообороте: люцерна (два года), озимая рожь на зеленый корм, поукосная кукуруза, кормовая морковь, вико-овсяная смесь на зеленую массу, поукосная кукуруза, кукуруза + подсолнечник на силос, кукуруза + соя на силос, ячмень с подсевом люцерны. Исследования выполнены в следующих вариантах удобрений: 1)  $N_9P_{13}K_9$  (без основного удобрения); 2) навоз (полуперепревший солоmistый от крупного рогатого скота) 5 т +  $N_{49}P_{56}K_{53}$ ; 3) навоз 10 т +  $N_{88}P_{98}K_{96}$ ; 4) навоз 15 т +  $N_{128}P_{141}K_{139}$ .

Наибольший экономический эффект был получен в варианте 10 т навоза +  $N_{88}P_{98}K_{96}$ . Действие систематического внесения названных систем удобрений на агрофизические и агрохимические свойства почвы представлено в табл. 92.

О важной роли комплекса агрохимических средств в регулировании плодородия и свойств свидетельствуют данные полученные в длительном (45 лет) стационарном агрохимическом опыте, заложенном в 1950 г. на дерново-подзолистой средне-суглинистой почве на территории учебно-научного почвенно-экологического центра МГУ Чашниково.

Экспериментальная часть работы выполнена в четырехпольном звене севооборота со следующим чередованием культур: подсолнечник на силос, ячмень, вико-овсяная смесь на зеленый корм и озимая рожь.

Из минеральных удобрений в опыте использованы аммиачная селитра, хлористый калий и суперфосфат двойной. За исследуемый период внесено кг/га: азота (N) – 3830, калия ( $K_2O$ ) – 3830, фосфора ( $P_2O_5$ ) – 3160.

Минеральные удобрения применялись на четырех фонах:

1. Контроль.
2. Известкование.
3. Органические удобрения.
4. Известкование + органические удобрения.

Схема опыта с минеральными удобрениями представлена в табл. 93.

Органические удобрения применяли с 1983 г. по 90 т/га за ротацию звена севооборота. Всего было внесено 270 т/га.



Таблица 92

**Влияние системного применения удобрений на агрофизические  
и агрохимические показатели плодородия почв (слой 0–30 см)\***

Вариант удобрений	Водо- прочный агрегат, %	Объем- ная мас- са, г/см <sup>3</sup>	Общая пороз- ность, %	Некапил- лярная пороз- ность, %	Водо- проницае- мость в полевых условиях, мм/ч/см <sup>2</sup>	Общая влажнос- ть, %	Капил- лярная влажнос- ть, %	Гумус, т/га
Перед закладкой опыта (среднее по фону 1972 г.)								
–	55,3	1,25	4,87	27,8	6,13	49,2	36,7	134,2
В конце второй ротации (1987 г.)								
I	55,8	1,26	49,6	28,1	6,79	48,9	36,9	123,1
II	56,7	1,22	51,0	28,6	8,68	50,4	38,7	134,0
III	57,4	1,20	51,6	29,1	10,14	51,1	39,6	142,1
IV	58,1	1,18	52,5	29,6	11,43	52,2	40,3	146,8
НСП <sub>0,5</sub>	1,1	0,07	1,8	1,0	1,6	1,4	1,7	6,1

\* Продуктивность севооборота по вариантам составила: I – 61,8; II – 77,9; III – 93,6; IV – 97,7 ц/га кормовых единиц.

Таблица 93

**Влияние длительного применения комплекса агрохимических средств  
на свойства и плодородие дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (1991 г.)**

Вариант	pH (KCl)	Hгмг/экв, почвы	Al, мг/100 г почвы	Гумус, %	V, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г почвы	K <sub>2</sub> O, мг/100 г почвы
Кислая почва							
Контроль	4,3	4,2	3,2	2,0	63,0	6,0	5,8
N	4,0	6,0	10,6	2,2	42,8	3,5	4,0
NP	4,2	6,0	6,8	2,2	46,9	17,2	4,0
НПК	4,1	6,2	5,8	2,4	47,4	15,0	15,7
Внесение навоза							
Контроль	5,0	1,7	2,2	2,3	84,0	6,1	6,0
N	5,2	2,8	4,5	2,4	68,9	6,2	6,4
NP	4,5	4,0	3,5	2,7	68,7	21,5	10,0
НПК	4,4	3,5	3,6	2,7	71,5	23,4	24,0
Известкование							
Контроль	6,9	1,0	0,5	2,3	90,3	10,0	10,0
N	6,8	1,0	1,8	2,2	88,4	6,2	6,0
NP	6,9	1,3	0,3	2,6	84,2	18,0	10,4
НПК	6,9	1,2	0,3	2,7	90,4	18,0	20,5
Навоз + Известкование							
Контроль	6,9	1,0	0,2	3,1	92,9	10,4	12,5
N	6,9	1,1	0,2	3,1	90,7	8,3	8,0
NP	6,8	1,2	0,2	3,4	90,7	20,0	12,4
НПК	6,9	1,2	0,1	3,8	90,7	23,0	20,3

Исследованиями установлено, что без научно-обоснованного использования системы минеральных и органических удобрений, известкования почвы на фоне комплекса агроприемов нельзя создать культурные агроэкосистемы с учетом реализации потенциальной продуктивности агроценоза в соответствии с биологическими требованиями культурных растений.

Длительное одностороннее применение физиологически кислых азотных и калийных удобрений существенно ухудшает физико-химические и биологические свойства почвы. Так, возрастает гидролитическая кислотность, содержание подвижного алюминия, заметно снижается степень насыщенности почв основаниями. Накопленные в почве подвижные формы фосфора и калия, вследствие ухудшения свойств почвы и нарушения соотношения питательных элементов, не используются культурными растениями для создания урожая, что подтверждается низкой их продуктивностью. Только при системном использовании агрохимических средств создаются наиболее благоприятные условия для реализации потенциальной продуктивности агроценоза (табл. 93).

При интенсификации использования пахотных земель, важно более объективно оценивать каждый агроприем. Так, кажущаяся сиюминутная выгода нередко приводит в последующем к негативным экологическим последствиям.

Это можно видеть на примере изменения агрофизических свойств черноземов при интенсивных техногенных возделываниях озимой пшеницы [Сапожников, 1990], табл. 94.

Воздействие ходовых систем тракторов приводит к уплотнению типичного чернозема до глубины 30 см. Это не может не повлиять и на физико-химические и биологические свойства почвы с вытекающими негативными последствиями. Так, установлено, что увеличение уплотнения этого подтипа чернозема только на 0,01 г/см<sup>2</sup> по сравнению с контролем, оптимальным показателем, снижает урожай ячменя на 0,9 ц/га (верхняя граница оптимальной плотности черноземов составляет 1,2 г/см<sup>2</sup>). Подсчитано, что при урожайности озимой пшеницы 50–60 ц/га, возделываемой по интенсивной технологии, недобор урожая зерна, вследствие уплотнения почвы, достигает 7 ц/га.

Рассмотрим основные методические принципы оптимизации питания растений отдельными биогенными элементами.

Актуальность проблемы азота в земледелии будет возрастать, так как этот элемент весьма мобильный и в почве в минеральной форме не накапливается. Поэтому с повышением общей окультуренности почвы с накоплением в ней в подвижной форме фосфора, калия и микроэлементов, величина и качество урожая в значительной степени будет определяться оптимизацией азотного питания растений. Это уже сейчас имеет место в ряде стран, где уже десятки лет применяются высокие дозы фосфорно-калийных и других минеральных удобрений и создан достаточный уровень содержания этих элементов в почве (США, Швеция, Великобритания, ФРГ, Нидерланды и др.).

Вследствие же невысокого коэффициента использования азота (0–50%) и высокой его подвижности в почве создается его дисбаланс в земледелии.

За последние годы большое внимание уделяется адаптации научных систем земледелия к природным ландшафтам. В этом случае, создаваемый антропогенным путем, агроландшафт должен максимально усиливать законы развития природного ландшафта. И так, в системе развития человек–природа доминирующая роль принадлежит разуму человека, который должен адаптировать свою деятельность к экологическим и биологическим законам природы, придавая им приоритетное значение.

**Агрофизические свойства типичного чернозема  
при интенсивном техногенном воздействии озимой пшеницы**

Показатель	Центр следа	30 см от следа	100 см от следа	Показатель	Центр следа	30 см от следа	100 см от следа
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,35	1,26	1,12	Порозность агрегатов, %	37,5	38,2	40,0
Агрегаты > 10 мм, %	69,3	52,8	36,3	Порозность меж-агрегатная, %	15,8	20,6	27,3
Порозность общая, %	47,4	50,9	56,4	Коэффициент фильтрации, мм/мин	0,6	1,7	2,2

При этом постоянно растущее население планеты нельзя обеспечить жизненно необходимыми условиями, базируясь только на экономном расходовании природных ресурсов. Это путь к нищете. Именно разумная деятельность человека и состоит в том, чтобы трансформация биосферы в ноосферу происходило при расширенном воспроизводстве природных ресурсов, в том числе и плодородия почвы, основного условия обеспечения людей высококачественными, т.е. экологически безопасными и биологически сбалансированными продуктами питания.

Существует прямая связь между уровнем плодородия почвы и экономикой страны, между экологической чистотой почвенного покрова и здоровьем человека.

Главное, чтобы пути и средства, применяемые человеком для воспроизводства плодородия почвы, были не инородны живой природе, не противоречили бы законам ее развития. "Отказ от современных технических и химических средств, не говоря уже о применении минеральных удобрений при существующем уровне народонаселения означал бы самую страшную из катастроф" [Кирюшин, 1996].

Следовательно, резкое снижение применения минеральных удобрений в отечественном земледелии неминуемо приведет к падению плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур, и в конечном итоге негативно скажется на российской экономике. Ликвидация же этих тяжелых последствий потребует больших затрат и длительного периода времени.

Оценку и оптимизацию азотного режима почв в основном проводят по содержанию в них минерального и нитратного азота в зависимости от почвенно-климатических условий. Поскольку эти вопросы тесно связаны с отзывчивостью культур к азотным удобрениям, то оптимизация азотного режима почв и методы диагностики потребности растений в азотных удобрениях должны рассматриваться во взаимодействии.

Избыточный азот теряется, загрязняя окружающую среду с комплексом вытекающих отсюда негативных последствий. Поэтому нужна надежная, научно обоснованная и проверенная практикой земледелия диагностика оптимизации доз азотных удобрений.

До последних лет дозы азотного удобрения определяли по данным полевых опытов и агрохимического анализа почвы на содержание гумуса, легкогидролизуемых форм органического азота, нитрификационной способности почвы или наличию минеральных форм азота в почве. Однако не все перечисленные пока-

затели достаточно хорошо коррелируют с отзывчивостью растений на азотные удобрения.

За последние годы в России и в практике мирового земледелия все большее признание получает оптимизация доз азотного удобрения по содержанию минерального (нитратного и аммиачного) азота в почве (метод N мин.).

Вопрос определения эффективных доз азота под ту или иную культуру носит региональный характер. Поэтому модификация методов диагностики азотного удобрения имеет свои зональные особенности. Разные подходы имеются и при определении доз азотного удобрения по содержанию минерального азота в почве, т.е. при применении метода N мин:

1. Допускается одинаковое усвоение растениями минерального азота почвы и удобрений. Зная потребность культурного растения в азоте на планируемый урожай и содержание минерального азота в почве, разницу компенсируют внесением азотного удобрения.

Этот метод нуждается в существенной доработке и совершенствовании, главным образом, в следующих направлениях:

- учет последствий органических и минеральных удобрений;
- мобилизация дополнительного “экстра” азота вследствие активизации процессов минерализации органического вещества почвы;
- влияние вида предшествующей культуры севооборота на азотный режим почвы;
- нитрификационная способность почвы;
- периодичность питания растений азотом;
- глубина взятия образцов почвы на агрохимический анализ по культурам в зональном аспекте;
- коэффициент использования азота почвы и удобрений в зависимости от культуры, свойств почвы, складывающихся погодных условий и т.д.

2. Второй вариант метода N мин заключается в определении индексов обеспеченности почвы минеральным или нитратным азотом и соответственно установлении степени нуждаемости культуры в азоте и дозы азотного удобрения.

3. Третий вариант этого метода заключается в определении содержания минерального азота в почве и величины нитрификационной способности. Отсюда исходят при определении степени потребности в азотных удобрениях и ориентировочные их дозы для отдельных культур.

Перечисленные методические подходы оценки азотного режима почвы и определения потребности растений в азотных удобрениях с теми или иными модификациями используются в различных земледельческих районах России.

Расчеты дозы азота, как и других элементов питания, можно проводить балансовым методом. В России большой вклад в разработку и совершенствование этого метода внесли А.В. Соколов, З.И. Журбицкий, И.С. Шатилов, Н.К. Болдырев и др.

Определение количества эффективного азота ( $N_{эфф.}$ ), которое дает растению сама почва в течение вегетации, по содержанию  $N_{мин}$  в начале вегетации проводится по формуле:

$$N_{эфф.}, \text{ кг/га} = \frac{N_{мин} \times d \times h \times \text{КИП}}{10 \times 100}, \quad (1)$$

а расчет дозы азота для получения запланированного урожая (или прибавки) производится по уравнению:

$$D_N, \text{ кг/га} = \frac{(B - N_{эфф.}) \times 100}{\text{КИУ}, \%}, \quad (2)$$

где  $D$  – доза азота на запланированный урожай в кг/га;  $B$  – вынос азота запланированным урожаем культуры, кг/га;  $N_{\text{мин}}$  – содержание минерального азота в почве ( $N\text{-NO}_3 + N\text{-NH}_4$ ), мг/кг;  $N_{\text{эфф.}}$  – количество эффективного азота (кг/га), которое растения получают из почвы (определенного ее слоя), с учетом текущей нитрификации в почве определяемой показателем КИП, % (уравнение 1);  $\text{КИП} - N_{\text{мин}}$  – коэффициент использования минерального азота почвы, % (для азота нитратов в черноземе слое 0–30 см он равен 200% по Н.К. Болдыреву);  $\text{КИУ}$  – коэффициент использования азота из минеральных удобрений;  $d$  – объемная масса одного см<sup>3</sup> анализируемого слоя, в г;  $h$  – глубина анализируемого слоя почвы в см;

$\frac{d \times h}{10}$  – масса слоя почвы в млн кг для перевода минерального азота почвы из мг на 1 кг в кг/га; 100 – постоянное число, связанное с выражением КИП и КИУ, %.

Ряд исследователей, основываясь на экспериментальных данных, учитывают КИП и КИУ по азоту. Тогда уравнение расчета доз азота упрощается, т.е.

$$D = B \frac{(N_{\text{мин}} \times d \times h)}{10}$$

Балансовый метод также не лишен недостатков, так как требует оптимальных значений показателей, включенных в приведенные уравнения.

Следовательно, одной из модификаций метода  $N_{\text{мин}}$  или балансовым методом можно с достаточной точностью установить дозу азотного удобрения для получения планируемого урожая озимой пшеницы. Методом растительной диагностики удастся проконтролировать уровень азотного питания растений и вносить коррективы путем применения весенней и поздней подкормки посевов. Сочетание методов почвенной и растительной диагностики дает возможность направленно регулировать уровень азотного питания озимой пшеницы в зависимости от разнообразия почвенно-климатических и агротехнических факторов.

Основными критериями при оценке оптимального фосфатного состояния почв, одной из главных характеристик общей окультуренности, служит содержание подвижного фосфора, при котором достигается наибольший урожай возделываемой культуры и отсутствие эффекта от дополнительно вносимых фосфорных удобрений.

При этом следует ориентироваться на ведущие и наиболее требовательные к уровню фосфорного питания культуры севооборота в конкретных почвенно-климатических условиях.

Исследованиями в длительных стационарных опытах установлены и значения оптимального содержания подвижного фосфора для основных типов почв (табл. 95).

При определении состояния фосфатного режима почв, следовательно, связанного с этим оптимизации фосфорного питания растений важно учитывать ряд особенностей:

1. Для более объективной оценки адекватности фосфорного режима почв и обеспеченности питания растений фосфором важно определять не только продуктивность отдельных культур, но и севооборота в целом.

2. Методы оценки фосфатного режима почв и оптимизации фосфорного питания растений.

3. Для полной оценки данной проблемы необходимо учитывать не только содержание подвижного фосфора по принятому для данной почвы метода, но и степень мобилизации его из потенциальных запасов.

**Группировка почв по содержанию подвижного фосфора, определяемого по методам Кирсанова, Чирикова, Мачигина**

N группы	Рекомендуемый цвет раскраски	Содержание подвижного фосфора	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг почвы по методу		
			Кирсанова	Чирикова	Мачигина
1	Бирюзовый	Очень низкое	Менее 25	Менее 20	Менее 10
2	Светло-голубой	Низкое	26–50	21–50	11–15
3	Голубой	Среднее	51–100	51–100	16–30
4	Светло-синий	Повышенное	101–150	101–150	31–45
5	Синий	Высокое	151–250	151–200	46–60
6	Темно-синий	Очень высокое	Более 250	Более 200	Более 60

**Группировка по содержанию подвижного фосфора, определяемого по методам Эгнера–Рима, AL**

N группы	Рекомендуемый цвет раскраски	Содержание подвижного фосфора	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг почвы по методу	
			Эгнера–Рима	AL
1	Бирюзовый	Очень низкое	Менее 50	Менее 50
2	Светло-голубой	Низкое	51–70	51–100
3	Голубой	Среднее	71–140	101–150
4	Синий	Повышенное	Более 140	151–200
5	Темно-синий	Высокое	–	Более 200

Ю.И. Касицкий [1986] разработал принципы дифференциации доз фосфорных удобрений в зависимости от обеспеченности почв подвижным фосфором (табл. 96).

За оптимальный уровень принято содержание подвижного фосфора (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) в почве, при котором может быть достигнуто не менее 90–95% от максимального уровня, недостающее 5–10% (на грани достоверности опыта) восполняются фосфорными удобрениями, компенсирующими вынос.

Продуктивность севооборотов при этом достигает 40–50 ц/га зерновых единиц. На орошаемых землях в условиях повышенной продуктивности требуются более высокие уровни обеспеченности подвижным фосфором.

Фосфор в земледелии является стратегическим элементом. Почвы, хорошо обеспеченные фосфором, за счет систематического внесения удобрений способны длительное время обеспечивать сельскохозяйственные культуры оптимально фосфорным питанием. Фосфор существенно смягчает действие экстремальных погодных условий на культурные растения, которые даже в условиях засухи, низких или высоких температур формирует высокий урожай. Дефицит фосфорного сырья и фосфорных удобрений в мировом земледелии вызывает в ряде стран, особенно Европы, необходимость повышения фосфатного уровня почв. В севообороте чаще всего это достигается путем периодического внесения высоких доз фосфорных удобрений. Этому благоприятствует ряд факторов: сохранение в почве фосфора в доступной для растений форме, слабая миграция его по профилю почвы и отсутствие практически потерь в окружающую среду, достаточная изученность оптимального содержания подвижного фосфора в почве для различных сельскохозяйственных культур и количества фосфорных удобрений, необходимо для достижения этого оптимального фосфатного уровня для каждо-

Таблица 96

**Дифференциация доз фосфорных удобрений и вынос фосфора растениями в зависимости от обеспеченности почв подвижным фосфором [Касицкий и др., 1986]**

Содержание подвижного P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в почве, мг/100 г	Дозы P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , кг/га	Коэффициент дифференциации доз **	Возможная продуктивность севооборотов, ц/га з.е. (основная продукция)	Возможный вынос P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , кг/га	Коэффициент изменения выноса	Остаточный фосфор в почве, кг/га
< 5	120	2	30–35	35–40	0,75	85–80
5,1–10,0	90	1,5	35–40	40–45	0,35	55–50
10,1–15,0	60	1,0	40–50	45–55	1,0	15–5
15,1–25,0	30	0,5	45–50 и более	55–60	1,15	–(25–30)
> 25	10*	0,2	45–50 и более	55–60	1,15	–(45–50)

*Примечание.* \* В рядок при посеве; \*\* за единую дозу ( коэффициент дифференциации 1 ) принята доза P<sub>60</sub>.

го типа почвы. В отличие от азота, в природе не существует естественных источников пополнения запаса фосфора в почве. Поэтому основной путь поддержания оптимального питания растений фосфором – внесение минеральных и органических удобрений. В связи с этим упрощается и изучение баланса фосфора в земледелии. Однако, как с точки зрения агрохимии, так и экологии, при использовании фосфорных удобрений возникает ряд нерешенных проблем:

1. Низкий коэффициент использования фосфора удобрений как отдельными культурами, так и в агроценозе.

2. Периодическое внесение высоких доз фосфорных удобрений или зафосфачивание почв нарушают баланс других биогенных элементов, что отрицательно сказывается на питании растений.

3. Наличие в фосфорных удобрениях примесей различных элементов, в том числе и тяжелых металлов, загрязняющих почву, природные водоемы и грунтовые воды. Часть их поступает в растения, снижая качество продукции и кормов для животных.

4. Иммобилизация (ретроградация) фосфора в почве в результате химического поглощения. Наиболее интенсивно эти процессы протекают на карбонатных черноземах, красноземах, кислых дерново-подзолистых почвах с высоким содержанием полуторных окислов железа и алюминия.

5. Мобилизация фосфатов почвы для питания культурных растений. Это имеет большое значение для тех земледельческих районов и на таких почвах, где в результате систематического внесения высоких доз фосфорных удобрений создались значительные его запасы, намного превышающие оптимальный фосфатный уровень.

Существуют и другие проблемы.

Оптимизация фосфорного питания сельскохозяйственных культур определяется их выращиванием в специализированных севооборотах, в конкретных почвенно-климатических условиях. При этом, если трудности оптимизации питания растений азотом связаны с высокой подвижностью нитратов в почве, то создание необходимого фосфатного уровня, внесение повышенных доз удобрений приводит к связыванию ряда биогенных элементов, например, цинка, меди, т.е. к нарушению баланса питательных элементов в почве, ухудшению условий питания другими элементами. В этом случае необходимо оптимизировать пита-

ние растений фосфором с учетом содержания в почве в доступных для растений форме других элементов.

Разработка и применение оптимальных доз фосфора тесно связано с комплексом агротехнических, химических, биологических методов мобилизации фосфора почвы, накопленного в результате систематического применения фосфорных удобрений.

Например, применение физиологически кислых азотных и калийных удобрений в сочетании с микроэлементами существенно мобилизует естественные запасы фосфора или накопленные, вследствие предварительного внесения фосфорных удобрений. В этом случае можно длительное время получать высокие урожаи сельскохозяйственных культур без применения фосфорных удобрений.

Известкование кислых дерново-подзолистых почв также мобилизует фосфаты почвы, связанные полуторными окислами алюминия и железа. Это позволяет существенно снизить дозы фосфорных удобрений или получать высокие урожаи без их внесения.

Б.С. Носко [1990] установил, что на фонах с повышенным содержанием фосфора и особенно с оптимальным соотношением N, P, K все элементы питания из почвы используются эффективно только до определенного уровня насыщения, который для чернозема, типичного по содержанию подвижного фосфора, составляет 10–12 мг  $P_2O_5$  на 100 г почвы при содержании  $N-NO_3 : P_2O_5 = 1:4$ . На высоких фонах значительная часть питательных веществ расходуется непроизводительно, они не используются в синтезе органических веществ. Кроме того, автор отмечает, что и после двух ротаций севооборота, несмотря на существенный вынос фосфора урожаем, сумма активных фосфатов в почве на высоком фосфатном фоне осталась значительной. Причем более половины фосфора, внесенного при создании агрохимического фона, после двух ротаций остаются в почве в форме активных фосфатов; они являются потенциальным резервом для питания растений в последующих ротациях.

Основным показателем обеспеченности растений калием принято считать его содержание в почве в обменной форме. В почве имеются значительные запасы калия и существует динамическое равновесие между различными его формами: калий почвенного раствора, обменный и необменный (фиксированный и природный глинистых минералов). В процессе питания растений нарушается динамическое равновесие и вовлекаются все формы почвенного калия. При этом имеет значение степень подвижности обменного калия, скорость восстановления его из резервных (необменных) форм. Все это затрудняет выбор объективного показателя оптимизации содержания калия в почве.

Наибольшей объективностью отличаются данные по содержанию обменных форм калия в почве, полученные в длительных стационарных опытах. Исследованиями установлено, что содержание калия 10–15 мг  $K_2O$  на 100 г почвы и применение умеренных доз калийных удобрений (60–90 кг/га  $K_2O$ ) обеспечивают продуктивность севооборотов в 30–50 ц/га зерновых ед. в год на дерново-подзолистых, серых лесных почвах и выщелоченных черноземах.

Эти параметры обеспеченности почвы калием могут быть уточнены при специализировании севооборота, известковании кислых почв, уровня обеспеченности почвы азотом и фосфором, биологических особенностей культур и других условий. Однако в практике земледелия этими показателями вполне можно пользоваться при определении оптимального обеспечения культур на заданную продуктивность.



Таблица 97

**Величины достаточной обеспеченности почв России подвижными микроэлементами, мг/кг почвы**

Зона	Микроэлемент	Почвенная вытяжка	Содержание микроэлемента: мг/кг почвы	Зона	Микроэлемент	Почвенная вытяжка	Содержание микроэлемента: мг/кг почвы
Таежно-лесная	B	Вода	0,7–1,0	Сухо-степная и полупустынная	B	Вода	2,0–4,0
	Cu	1Н НСl	4,0–6,0		Cu	1Н KNO <sub>3</sub> + +HNO <sub>3</sub> (по Гюльбах-мадову)	3,0–5,0
	Mo	оксалатная	0,3–0,4		Mo	"	0,5–1,0
	Mn	0,1Н H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60–100		Mn	"	30–90
	Co	1Н HNO <sub>3</sub>	2,0–3,0		Co	"	2,0–3,0
	Zn	1Н KCl	2,0–4,0		Zn		4,0–6,0
Лесостепная и степная	B	Вода	0,8–1,0				
	Cu	1Н НСl	4,0–5,0				
	Mo	оксалатная	0,4–0,5				
	Mn	0,1Н H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	90–170				
	Co	1Н HNO <sub>3</sub>	3,0–4,0				
	Zn	1Н KCl	1,0–2,0				

В России на основании обобщения многочисленных экспериментальных данных установлены величины достаточной обеспеченности почв основных почвенно-климатических зон подвижными формами микроэлементов. Эти данные также относительны, так как получены в результате проведения полевых и вегетационных опытов, анализа почв и растений, усреднения многочисленных литературных источников (табл. 97).

### Глава 7

## ОСОБАЯ ОХРАНА И КРАСНАЯ КНИГА ПОЧВ, КАДАСТР ЦЕННЫХ ПОЧВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Являясь важнейшим структурно-функциональным компонентом биосферы, почва одновременно включена в сложнейшие взаимодействия природы и общества. В ходе этого взаимодействия подавляющее большинство почв претерпевают глубокие изменения, следствием которых оказываются сильные трансформации естественных почвенных экофункций, как правило, негативной направленности. В результате ослабления многих экологических функций почв и поч-

венной оболочки биосфера Земли приходит во все более неустойчивое состояние с признаками глобализации катастрофических процессов [Добровольский, Никитин, 1990; 1996; Ясаманов, 1993; Лосев, Ушаков, 1997; Кульпин, 1997].

В этой связи в число важнейших природоохранных направлений выдвигается не только общая защита освоенных земельных угодий от дальнейшего антропогенного пресса, но и проблема особой охраны эталонных, редких и исчезающих целинных и слабо измененных человеком почв, наиболее успешно выполняющих свои естественные экофункции. С данной проблемой тесно соприкасаются вопросы строго регламентированного щадящего использования наиболее ценных высокопродуктивных земель, имеющих особое экологическое значение.

Указанные задачи, однако, в процессе своей практической реализации наталкиваются на очень существенные трудности, значительная часть которых связана со слабой разработанностью нормативно правовой базы особой охраны почв и отсутствием соответствующей Красной книги почв и кадастра ценных почвенных объектов.

В чем причина столь незавидного положения и какие основные пути выхода из него?

Говоря о том, почему до сих пор не создана Красная книга почв России и официально не утвержден ни один почвенный заповедник, заказник, почвенный памятник природы, следует прежде всего учитывать историю развития охраны природы вообще и место в ней почвенного направления.

Известно, что еще задолго до промышленного бума XIX–XX столетия ученые не были безразличны к проблеме сохранения природы: “природоохранному движению на Западе уже по меньшей мере 200 лет, началось оно уже при освоении тропиков” [Ричард Х. Гроув, 1993]. Но, к сожалению, в концептуальном и практическом отношении данное движение на долгие годы получило в основном ботанико-зоологическую окраску. Охрана почв как самостоятельная задача была сформулирована значительно позже, причем приобрела она, главным образом, эрозионный антизагрязнительный характер. Проблема же особой охраны эталонных, редких и исчезающих почв путем организации почвенных заказников, заповедников, почвенных памятников природы поставлена в последние годы в основном в связи с разработкой учения об экологических функциях почв и их сохранения [Добровольский, Никитин, 1990; 1996]. Поэтому даже среди ученых, не говоря уже о широкой общественности, пока нет общего взгляда на данную проблему.

В связи со сказанным, прежде всего ответим на вопрос, зачем нужна особая охрана почв и каков механизм ее реализации. Под особой охраной почв мы понимаем учет, сохранение и восстановление наиболее ценных почвенных объектов повышенной значимости, которые достаточно разнообразны: почвы целинные, эталонные, редкие и исчезающие; почвы опорных пунктов исследовательских учреждений и ключевых учебных полигонов; почвы среды обитания растений и животных, занесенных в Красную книгу редких и находящихся под угрозой исчезновения видов; почвы археологических объектов и мемориального значения и др.

Разнообразны и основные формы охраны особо ценных почв, сбережение которых возможно путем организации комплексных или специализированных почвенных заказников, заповедников, почвенных памятников природы, почвенно-палеонтологических и почвенно-археологических заказников, агропочвенных заказников и др.

Однако практическая реализация особой охраны почв сопряжена с огромными трудностями. Это связано прежде всего с тем, что стремительно скатываясь в пропасть жестокого глобального экокризиса, в существенной степени связанного с разрушением почвенного царства Земли, современная цивилизация весьма слабо позаботилась о правовом обеспечении сохранения почв планеты. Абсолютное большинство разделов и статей конституционного, гражданского, уголовного права посвящены регулированию общественных и межличностных отношений.

Отношения же между природой и обществом, человеком и окружающей средой юридически оформляется с явным запозданием и недостаточной глубиной. Особенно отстает правовое обеспечение охраны почв. При этом нередко игнорируется необходимость сохранения почвы наравне с другими компонентами природы. Так, в Конституции страны 1970–1980 гг. было указано, что охране подлежат Земля, ее недра, растительный покров, животный мир, воздушный бассейн и водные ресурсы. Почвенный же покров при перечислении охраняемых природных феноменов отдельно не указан. Обеспечение его сохранности, по мнению авторов природосохранного раздела данной Конституции, должно, судя по всему, регулироваться земельным правом.

Такой подход сохраняется до настоящего времени, поскольку на сегодня почвенное право в качестве самостоятельного раздела отсутствует.

В этой связи представляет интерес рассмотреть насколько обеспечивается эффективность правового механизма сохранения почв в рамках современного земельного права. Основные концептуальные установки данной правовой отрасли исходят из того, что под землей прежде всего понимается “поверхностный слой земной коры, включающий голую материнскую породу, поверхность дна водоемов, почвы и другие элементы” [“Земельное право России”, 1995, с. 4].

Такая трактовка земли для ее юридической защиты отчетливо свидетельствует о разнопорядковости подводимых под данное понятие объектов и, следовательно, невозможности адекватной правовой реакции на нужды охраны почв в рамках указанной концепции. Действительно, если голые материнские породы и почвы воспринимать как качественно однопорядковые образования, тогда нет нужды всерьез заниматься правовым обеспечением сохранения географо-генетического почвенного разнообразия как одного из главных условий сбережения биологического разнообразия. Ведь голый материнский субстрат не обладает теми экофункциями и свойствами, которые делали бы его важнейшей незаменимой экологической нишей для наземных организмов. Такими функциями и свойствами обладают лишь почвы, возникающие после соответствующего преобразования материнской породы под воздействием почвообразовательного процесса в течение достаточно длительного времени.

Не приносит желаемого удовлетворения и Земельный кодекс РСФСР 1991 г. В нем, хотя и выделяются впервые в самостоятельную категорию земли особо охраняемых территорий, интересы сохранения почвенного разнообразия не просматриваются с той же отчетливостью, что и интересы спасения редких и исчезающих видов растений и животных. И не случайно в специально подготовленном законопроекте “Об особо охраняемых природных территориях” первоначально почва как один из объектов особой охраны природы вообще не упоминалась. Она “растворилась” в понятии земля, что нельзя признать оправданным, поскольку данный термин, кроме приведенного выше определения, имеет еще много других значений.

Так, в Словаре русского языка Ожегова мы находим более десяти смысловых значений слова Земля.

Многозначность понятия земля делает расплывчатыми многие правовые природоохранные положения и порой неясно даже, о чем идет речь – то ли о защите от деградации территории в целом, то ли об охране верхнего плодородного слоя земной коры почвы, или о том и другом одновременно.

В связи со сказанным вполне отчетливо просматривается необходимость специальной углубленной разработки почвенного права как самостоятельной правовой отрасли, которая бы в полной мере законодательно обеспечила сохранение почв и почвенного покрова нашей планеты. Ратуя за поднятие правового статуса охраны почв, следует сразу же оговориться, что аналогичного юридического усиления требуют и другие природоохранные направления, что делает весьма актуальным развитие междисциплинарных аспектов юридической науки и совершенствование правовой системы в целом. В плане соображений по данной проблеме нами приводится перечень и структура основных направлений и отраслей права, которые бы более полно отражали задачи спасения гибнущей природы и ее детищ (рис. 37).

Выделяются три базовых направления правовой системы социальное, природно-социальное и природное. Социальное направление включает в себя следующие основные виды права: конституционное, гражданское, трудовое, административное, уголовное. Именно на эти виды права падает львиная доля всех законодательных и нормативных актов, поскольку они регулируют главное, чем жила до недавнего времени цивилизация – это общественные, общественно-личностные и межличностные отношения.

Второе направление, природно-социальное, включает такие виды права как экологическое, земельное, горное, водное, лесное право. Ряд составляющих данного направления активно стали разрабатываться лишь в последние десятилетия. Это касается прежде всего экологического права [Петров, 1980; 1995; Голиченков, 1984].

Экологическое право определяется как “совокупность правовых норм и правоотношений, регулирующих общественное отношение в сфере взаимодействия общества и природы” [Петров, 1995]. Экологическое право опирается на ряд специализированных правовых отраслей и является более зрелой формой регулирования взаимодействия общества и природы, в котором выделяется четыре этапа: гражданско-правовой, земельный, земельно-ресурсный, экологический.

Известно, что заглавную роль в системе природно-общественных отношений долгое время выполняло земельное право, которое через свои регулятивные нормы выражало интересы общества в потреблении природных ресурсов. В дальнейшем по мере широкого включения в хозяйственную эксплуатацию различных природных ресурсов и накопления правового материала по регулированию их использования из земельного права стали выделяться другие отрасли: лесное, водное, горное.

Третьим направлением, которое представляет важнейшую стратегическую задачу развития правовой системы, является природное право, где целесообразно выделить планетарно-биосферное, биологическое, почвенное, геологическое и географическое право (рис. 37). Данное направление в настоящее время разработано явно недостаточно, определенные достижения существуют в основном в области правового обеспечения сохранения видов живых организмов.

Кроме того, уже осознана необходимость правового обоснования защиты природных комплексов, подтверждением чему является организация сети биосферных заповедников и резерватов. Появилась первая монографическая пуб-

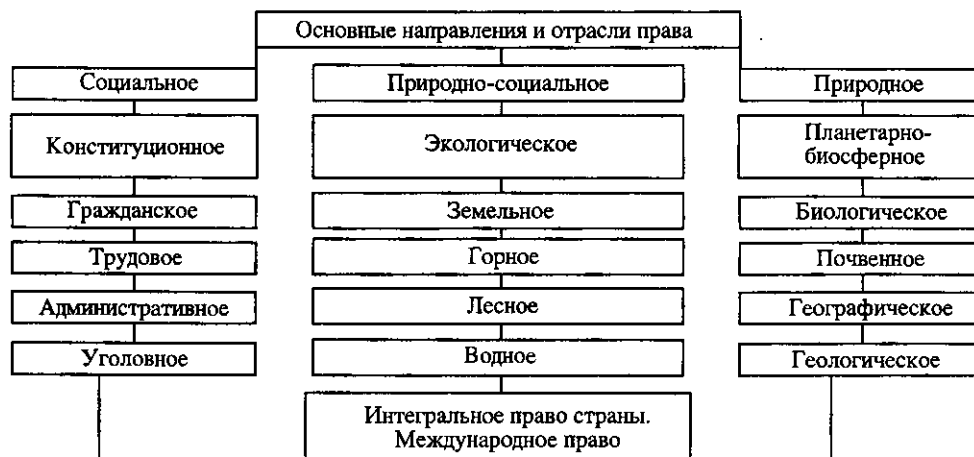


Рис. 37. Общая структура права

ликация по Красной книге экосистем В.В. Крючкова и др. Однако в целом развитие природного права, которое юридически обеспечивало бы сохранение естественной природы в различных ее формах, совершенно недостаточно.

Причин такого незавидного положения много. И среди них в числе важнейших явное отставание в разработке теоретических проблем сохранения биосферы и ее компонентов. С недопустимой медлительностью научная и общественная мысль дозревает до истины, что без сохранения и восстановления естественной исторической биосферы и ее составляющих земная цивилизация обречена.

Наконец, получает признание положение о том, что землянам для того, чтобы иметь виды на будущее, необходимо сохранить не менее 30 % естественной природы [Горшков, 1995]. По нашим представлениям доля естественных природных комплексов должна быть еще более значительной. Но без юридической гарантии особой охраны природы и ее расширения данную задачу не решить.

На сегодня в России правовое обеспечение сохранности имеют лишь около 3% природных комплексов, входящих в сеть особо охраняемых территорий. Поэтому развитие природного права для нашей страны чрезвычайно актуально. Повышенное беспокойство вызывает замедленное решение правовых вопросов сохранения почв, в первую очередь задач особой охраны ценных почвенных объектов. Правоведы уже достаточно давно призывают к охране всей экологической цепи: "С точки зрения правовой обеспечение естественного воспроизводства (восполнения) каждого конкретного элемента среды должно осуществляться путем мероприятий по охране всей экологической цепи и отдельных ее элементов" [Голиченков, 1984]. Однако почва, являясь центральным звеном экологической цепи, имеет явно недостаточную юридическую защиту.

Так, в Уголовном кодексе Российской Федерации на долю природоохранительных статей до самого последнего времени приходится менее 5% при почти полном отсутствии уголовной ответственности за разрушение почв.

О явном отставании правового обеспечения сохранения почв свидетельствуют и принимаемые в последние годы юридические и нормативные акты государственных органов РФ в области охраны окружающей среды и природопользования. Так, из более чем 150 таких актов, принятых в богатом на данные документы 1994 г., непосредственно почв касалось только Постановление Правительства Российской Федерации от 23.02.94 года N 140 "О рекультивации зе-

мель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы” [Экология России, 1995]. Ранее правовое подкрепление получили рекомендации по защите почв от эрозии [Кузнецов, Глазунов, 1996].

Следует отдельно сказать о законе Российской Федерации о почвах, в экспертной оценке которого авторы принимали участие. Прежде всего очевидна исключительная необходимость такого закона. Но, к сожалению, имело место запаздывание в его разработке и принятии. Кроме того, при подготовке данного закона было уделено неодинаковое внимание различным направлениям использования и охраны почв, поэтому мы были вынуждены внести в подготовленный проект ряд существенных замечаний и дополнений. Например, было предложено не ограничивать формы особой охраны почв только почвенными заповедниками, но и предусмотреть создание сети почвенных памятников природы и заказников. Акцентировалось также внимание на необходимость весомой правовой аргументации создания Красной книги особо ценных редких и исчезающих почв и кадастра ценных почвенных объектов.

Однако, чтобы реально состоялось правовое санкционирование “красно-книжного” блока и развернулись практические работы по его реализации, весьма важно уяснение специалистами и правоведами природоохранного характера вопроса. В этой связи кратко осветим проблему создания Красной книги почв, более подробное рассмотрение которой нами было дано ранее [Никитин, 1989; 1997; Добровольский, Никитин, 1990; 1996; Никитин, Скворцова, 1994; 1996 и др.].

Известно, что Красная книга – документ исключительной важности, в который заносят объекты, подлежащие особой охране в связи с реальной угрозой их исчезновения или сильной деградации. Сама идея Красной книги предполагает, что в нее включаются различные исчезающие ценные природные образования: редкие виды растений и животных, типичные экосистемы, уникальные геологические, палеоантологические и др. объекты. Объекты должны включаться разные, но сегодня мы имеем лишь Красную книгу растений и животных. Красные же книги исчезающих экосистем, почв и геологических образований находятся лишь в стадии своего создания, что существенно тормозит сбережение многих “произведений природы”, оказывающихся незащищенными специальной охранной грамотой. Одна из причин слабого продвижения в данном вопросе – явно недостаточное осознание значимости всех детищ эволюции Земли. Необходимо довести оценку неживой природы до уровня восприятия видов живых организмов, в отношении которых справедливо считают, что “любой вид – это уникальное чудо, подобное произведениям искусства, которое мы с благоговением храним в музеях” [Биология охраны природы, 1983].

О видах почв также должна быть бережная забота, в связи с чем необходимо сохранить разнообразие естественных почвенных разностей и включить в Красную книгу те, которые находятся под угрозой исчезновения. Это нужно сделать по многим причинам и прежде всего для сохранения биосферы и успешного решения многих практических задач. Последнее объясняется в первую очередь потребностью в эталонных почвах для проведения мониторинга и сравнительного анализа процессов, происходящих в целинных и освоенных землях, так как и после окультуривания почвы продолжают оставаться под воздействием факторов почвообразования. Знать, какие изменения в пахотных землях вызываются человеком, а какие природой, необходимо для выработки оптимальных систем земледелия и максимального использования почвенного плодородия, не только созданного трудом людей, но и постоянно возобновляемого естественным почвообразовательным процессом.

Естественное же плодородие почвы при правильном обращении с ней может сохраняться на достаточно высоком уровне в течение очень длительного времени, что было доказано всемирно известными опытами на Ротамстедской станции [Кук, 1970]. Однако изначальное плодородие почв во многих случаях используется неэффективно, а нередко почти полностью блокируется.

Недооценка возможностей естественного почвенного плодородия во многом объясняется малочисленностью соответствующих исследований, которые в освоенных районах трудно проводить из-за ограниченности эталонных целинных почв, особенно в степных и лесостепных районах, почти сплошь распаханых и застроенных.

Несомненная практическая польза от заповедных почв и в том, что благодаря им реализуется отчасти оптимальное чередование обрабатываемых земель с целинными и залежными, с тем, чтобы последние могли выполнять роль поставщиков полезных микроорганизмов и беспозвоночных животных, которые постоянно гибнут на полях в связи с повышенной антропогенной нагрузкой на них.

Можно привести много и других убедительных доводов в пользу незамедлительного создания Красной книги почв, но на это могут возразить: зачем это делать – ведь в уже существующих ныне заповедниках есть и почвы. Да, есть, но далеко не все, которые необходимо непременно сохранить. И причина здесь прежде всего в том, что подавляющая часть заповедных территорий выделялась для защиты растений и животных, а почвы в них попадали постольку поскольку. В результате многие исчезающие почвенные разности не попали в ныне существующую сеть заповедников, заказников, памятников природы, биосферных резерватов и не могут в нее попасть, так как не внесены в Красную книгу – документ, обязывающий оберегать все занесенные в нее природные образования. Поэтому сейчас, когда дополнительное расширение особо охраняемых территорий не только обсуждается, но и реализуется на практике, весьма злободневным оказалось отношение к этому почвоведов и всех, кто связан с использованием и изучением природных ресурсов. Ведь от того, как будет заповедаться почва, во многом зависит успешное решение всей природоохранной проблемы. Поэтому весьма актуально своевременное включение всесторонней программы почвенного заповедания в общую систему долгосрочных мероприятий по развитию сети особо охраняемых территорий.

Данная сеть характеризуется отчетливой тенденцией к своему расширению. По некоторым экспертным оценкам, общая площадь заповедников, заказников, национальных парков, памятников природы в нашей стране в недалеком будущем должно удвоиться – утроиться. Нет необходимости специально доказывать, насколько важны работы почвоведов по организации особо охраняемых природных территорий с учетом задач охраны почв.

Несомненно, что одним из условий научно обоснованного заповедания почвенных разностей является разработка Красной книги почв. К сожалению, данная проблема была поставлена сравнительно недавно. В отечественной почвоведческой литературе идея необходимости создания Красной книги почв высказывалась нами, начиная с 1979 г. [Никитин, 1979; 1980; 1982; 1989; Добровольский, Никитин, Орлов, 1984; Никитин, Орлов, 1985 и др.]. Ряд важных аспектов проблемы рассмотрен И.А. Крупенниковым. За создание Красной книги почв высказался также в 1983 г. академик М.С. Гиляров [Крупенников, 1985], а в дальнейшем и ряд других ученых (Л.О. Карпачевский, Л.Н. Ташнинова, А.М. Русанов, О.В. Чернова, А.И. Климентьев и др.).

При разработке Красной книги почв в качестве одного из исходных положений, по-видимому, должно быть использование опыта создания уже реализованной Красной книги растений и животных. Известно, что данный документ распространяется на редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных и растений. Есть основания считать, что и Красная книга почв также должна преследовать подобную цель применительно к почвенным телам. Однако полная аналогия в данном случае не возможна, что связано, прежде всего, со спецификой почвенных образований, особенностью воздействия на них человека, достигнутым уровнем знаний о реальном разнообразии почв и др.

В связи с этим возникает необходимость в специальном определении почвенных объектов, подлежащих высшим формам охраны. При этом необходимо учитывать, что имеются три основные категории почвенных образований: целинные (естественные), освоенные человеком и окультуренные, т.е. приобретшие существенно более высокий уровень плодородия благодаря рациональному землепользованию. В Красную книгу почв правомочно включение представителей любой названной категории, но цели и формы охраны могут заметно различаться.

Из категории целинных земель в Красную книгу почв целесообразно прежде всего включение эталонных представителей тех почвенных разностей, для которых существует угроза значительного изменения, деградации или исчезновения под влиянием в первую очередь антропогенных факторов. Основная задача особой охраны почв данной категории – это сохранение наибольшего разнообразия естественных почвенных разностей, структур почвенного покрова и их биоценозов. Поэтому кроме редких и исчезающих целинных почв режим высших форм охраны должен быть наложен и на наиболее представительные эталоны широко распространенных естественных разностей с целью устранения опасности их бесконтрольного освоения и организации своевременного всестороннего изучения. Определенные географические разновидности этих эталонов также подлежат особой охране.

Главными формами охраны целинных почв, включенных в Красную книгу, следует считать режим заповедников, а также бессрочных почвенных заказников специального режима. На территории заповедников исключается всякая хозяйственная деятельность, на территории почвенных заказников специального режима разрешаются только те виды деятельности, которые не связаны со сколько-нибудь заметным воздействием на почву (охота, умеренный сбор ягод и грибов, заготовка кормов и лекарственных растений).

При решении вопроса о включении в Красную книгу тех почв, которые подверглись освоению, необходимо, прежде всего, выявить наименее измененные разности, близкие целинным почвам, нуждающимся в охране.

В связи с высоким уровнем антропогенного изменения среды многие почвенные разности фактически остались без целинных эталонов. Особенно в трудном положении оказались черноземы. Так, почвенный покров многих лесостепных и степных европейских районов оказался освоенным значительно выше нормы оптимального освоения. Следует учитывать, что полное освоение территории приводит к минимуму полезной продукции, равному 25% от возможного максимума [Реймерс, Штильмарк, 1981 и др.].

Ясно, что переводение части освоенных земель на режим особой охраны – задача исключительной практической и научной значимости, требующая безотлагательного решения. Ведь освоенные земли с каждым годом все сильнее видоизменяются, особенно под влиянием эрозии и техногенного загрязнения.



Какие же формы охраны наиболее целесообразны в отношении освоенных почв, подлежащих включению в Красную книгу. На наш взгляд, наиболее широко распространенной формой охраны на первом этапе реализации почвозащитных мер должна стать организация почвенных заказников общего режима. На территории таких заказников исключается широкомасштабное строительство промышленных, бытовых и жилищных объектов, мероприятия по защите среды от загрязнения проводятся в полном объеме. Обработка земель и возделывание сельскохозяйственных культур допускается только при условии действительного соблюдения всех мероприятий, предотвращающих эрозию и деградацию почв.

На отдельных участках наименее измененных освоенных почв целесообразна организация заказников специального режима и заповедников с целью обеспечения необходимой представительности надежно сохраняемых эталонных и редких почв. Для облегчения практического решения вопросов особой охраны почв на первых порах можно в основном опираться на организацию небольших по площади почвенных заказников и заповедников. За широкую организацию небольших, но достаточно распространенных резерваторов сейчас ратуют многие ученые и специалисты. Это, по-видимому, во многих случаях наиболее легко осуществимая форма сохранения природы, способствующая одновременно широкомасштабному облагораживанию окружающей среды.

Кратко остановимся на тех конкретных первоочередных задачах, которые предстоит решить на современном этапе разработки Красной книги почв. Прежде всего, необходимо точно установить какие почвы к настоящему времени оказались включенными в уже существующую в стране систему заповедников и заказников. К сожалению, приходится констатировать, что на сегодняшний день мы не знаем полностью, какие же почвы находятся у нас под надежной защитой режима особо охраняемых территорий. Пока нет ни одной полной сводки по данному вопросу, что во многом связано с тем, что далеко не все почвы заповедников и заказников изучены с необходимой полнотой, далеко не всем из них дана надежная диагностика и классификационное определение (Карпачевский, Строганова).

Так, анализ материалов, изложенных в последнем издании монографии "Заповедники СССР" и в книге "Заповедники России" (1995), показал, что сведения о почвах имеются примерно лишь для 25% заповедников. Для остальных заповедников такие сведения просто отсутствуют. Следовательно, первейшая необходимость – создание общей сводки и списка уже заповеданных почв. Необходимо прежде всего знать какими особо охраняемыми почвами мы уже располагаем. Для этого, конечно, потребуются дополнительные исследования. Причем, необходимо срочное проведение данной работы. Без этого невозможно дальнейшее продвижение вперед в разработке Красной книги почв.

Другая задача первостепенной важности связана с выявлением всех редких и исчезающих естественных почвенных разностей. Они исчезают в силу различных причин: эрозии, застройки промышленными и городскими объектами, загрязнения, глубокого преобразования техническими мероприятиями и др. Одновременно необходима работа по выявлению эталонных почвенных профилей наиболее полно характеризующих различные систематические категории почв (виды, роды, подтипы и др.).

Решение этих и взаимосвязанных с ними задач позволит наметить общие контуры почвенных объектов, которые необходимо включить в Красную книгу почв. Конкретные предложения уже имеются (табл. 98 и 99).

**Почвы-претенденты на включение в Красную книгу почв России  
(полноразвитые, целинные и слабоизмененные человеком варианты)**

Почвы, отображаемые на почвенной карте РСФСР, м-б 1:2,5 млн

Почвы лесостепей и степей

Темно-серые лесные, со вторым гумусовым горизонтом, буровато-темно-серые  
Черноземы оподзоленные, в т.ч. мицелярно-карбонатные  
Черноземы выщелоченные, в т.ч. мицелярно-карбонатные  
Черноземы типичные  
Черноземы обыкновенные  
Черноземы южные  
Черноземы мицелярно-карбонатные  
Черноземы языковатые и карманистые выщелоченные  
Черноземы языковатые обыкновенные и южные  
Черноземы мучнисто-карбонатные (промытые)  
Черноземы осолоделые, солонцеватые, слитые  
Лугово-черноземные

Комплексы степей

Черноземы и солонцы автоморфные  
Черноземно-луговые и солонцы луговые

Почвы сухих степей и полупустынь

Темно-каштановые типичные  
Темно-каштановые мицелярно-карбонатные  
Темно-каштановые мучнисто-карбонатные и остаточно-карбонатные  
Каштановые  
Светло-каштановые

Комплексы сухих степей

Каштановые и солонцы

Успешная разработка Красной книги почв, конечно, прямо зависит от всесторонней разработки общей теории охраны и рационального использования почв, поиска объективных общепринятых исходных положений и понятий, определяющих данную проблему и пути ее решения. В данной области, несмотря на значительные достижения последних лет, остается еще много неясного и слабо разработанного, не позволяющего в полной мере оценить разностороннюю пользу от практической реализации Красной книги почв. Есть основания утверждать, что для подлинного понимания значения сбережения и особой охраны мира почв особенно важно учение о незаменимости почвенного покрова в биосфере и экологической полифункциональности почв. В свете данного учения вопросы создания Красной книги почв и всесторонней их охраны и рационального использования выходят за рамки просто почвозащитных вопросов. Они поднимаются до уровня проблемы сохранения благополучия биосферы планеты в целом, поскольку биогеоэкологические и глобальные функции почв (прежде всего естественные) являются обязательным условием реализации и сохранения исторически сложившихся круговоротов вещества и энергии на Земле, без чего жизнь на ней оказывается невозможной.

Оценивая современное состояние разработки почвенной Красной книги, можно констатировать, что с момента высказывания самой идеи учреждения

Почвы лесной зоны ЕТР и Западной Сибири первоочередной охраны

Широко распространенные почвы, нуждающиеся в эталонных особо охраняемых участках		Редкие почвы и почвы ограниченного распространения, нуждающиеся в особо охраняемых территориях	
Почвы	Районы распространения	Почвы	Районы распространения
Глеево-подзолистые	Северная тайга ЕТС	Дерновые шунгитовые	Тайга Карелии
Собственно подзолистые	Средняя тайга ЕТС	Подбуры	Северная, средняя тайга ЕТС
Дерново-подзолистые	Южная тайга ЕТС	Дерново-карбонатные	Лесная зона ЕТС
Дерново-палево-подзолистые	Хвойно-широколиственные леса	Группа бурых лесных почв	Южная тайга и хвойно-широколиственные леса ЕТС
Слабоподзолистые глееватые	Северная и средняя тайга Западной Сибири	Почвы ополей Буроземы Поддубицы	Западные районы
Дерново-подзолистые со вторым гумусовым горизонтом и дерново-глеевые	Южная тайга Западной Сибири	Коричнево-бурые	Приуралье
Подзолы песчаные	Лесная зона ЕТС и Западной Сибири	Подзолистые со вторым гумусовым горизонтом	Средняя тайга Западной Сибири и отчасти ЕТС
Почвы с двумя элювиальными горизонтами на двучленных породах	Лесная зона ЕТС и Западной Сибири	Подзолистые и дерново-подзолистые на ленточных глинах	Лесная зона Приуралья
		Карликовые подзолы	Кольская и карельская тайга
		Подзолы с мощным ортандовым горизонтом	Тайга Западной Сибири и ЕТС
		Темноцветные почвы западин	Южная тайга и хвойно-широколиственные леса ЕТС

данного почвоохранного свода и организации при обществе почвоведов рабочей группы по созданию Красной книги почв (председатель Е.Д. Никитин, секретарь Е.Б. Скворцова) произошло заметное продвижение вперед в решении этой узловой проблемы. Так, кроме наших работ появилось значительное число публикаций других авторов, включающихся в работу в данном направлении [Чернова, 1995; Ташнинова, 1996; Климентьев, Блохин, 1996 и др.]. Впервые на съезде почвоведов (СПб., 1996) проходили специальные заседания по интересующему нас кругу вопросов, что нашло отражение в самостоятельном “краснокнижном” разделе трудов этого съезда.

Однако скорость решения задач особой охраны и создания Красной книги почв явно недостаточна. Слишком велики оказались потери в почвенном царстве Земли, чтобы и далее медлить с его защитой и восстановлением. Сейчас уже очевидно, что эффективное решение этой давно назревшей проблемы на общественных началах и на энергии отдельных энтузиастов оказывается невозможным. Необходимы специальные программы по особой охране и Красной книге почв с правовым и финансовым их обеспечением, а также подключение к данной проблеме научного потенциала страны с постановкой соответствующих тем в ведущих почвенных научных и учебно-научных центрах.

Параллельно с разработкой и реализацией указанных целевых программ особой охраны почв необходимо использовать и другие возможные механизмы сохранения почвенного разнообразия. К числу таких механизмов, несомненно, относится создание кадастра ценных почвенных объектов (ЦПО). Если в Красной книге почв указываются ареалы редких и исчезающих почвенных разновидностей, то в кадастр ЦПО заносятся конкретные почвенные объекты с указанием их пространственных границ, степени изученности, почвенно-географическими характеристиками и адресными рекомендациями по охране и рациональному использованию. Такой кадастр готовится рабочей группой по особой охране и Красной книге почв при Докучаевском обществе почвоведов России.

В кадастре ЦПО при его необходимом пополнении целесообразно в перспективе выделить несколько уровней (федеральный, региональный, местный). Он должен утверждаться соответствующими почво- и природоохранными организациями и наряду с Красной книгой почв, являться важным нормативно-правовым документом, препятствующим валютаристскому обращению с реальными почвенными участками и площадями, имеющими повышенное экологическое, научное и хозяйственное значение.

Заканчивая рассмотрение затронутых вопросов особой охраны почв и некоторых механизмов ее реализации, обратим внимание на то, что развитие учения об экологических функциях почв стимулировало не только разработку ряда научных направлений. Оно также показало исключительную остроту многих чисто прикладных задач, без успешного решения которых биосфера может фактически утратить свой наиболее эффективный компонент – естественно-историческую почвенную оболочку планеты [Никитин, Гирусов, 1993 и др.], ставшую в связи с деятельностью человека шагреновой кожей Земли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Экологические функции, генезис и использование почв

До сих пор российское почвоведение традиционно уделяло большое внимание генезису и классификации почв. Оценку почвообразования проводили по изменению профиля почв по сравнению с исходной породой, учитывали изменения таких свойств, как валовой состав, гранулометрический состав, содержание гумуса, состав обменных катионов, рН и пр. Иными словами, влияние факторов почвообразования на формирование разных почв оценивали на основании приуроченности тех или иных почв к определенным климатическим, геоморфологическим условиям, к определенным растительным формациям. Следует отметить, что на данном пути были достигнуты значительные успехи, перевернувшие представление людей не только о почвах, но и о биосфере в целом. Главное отличие почв от горных пород – новая структура их, которая выражается в формировании системы анизотропности и системы агрегированности почв. Формирование гумусового слоя было отмечено, как процесс наиболее характерный для почв, отличающий почвы от геологических пород. Однако экологические функции еще больше характерны для почв, чем гумус, который далеко не всегда представлен собственно гумусовыми веществами, а часто в него включают подстилку (“лесной гумус”), торф. В то же время преобразующаяся в почву порода уже обладает экологическими функциями. Появление экологических функций – первый признак рождения почв (еще до их гумусирования). Поэтому новый подход к почве с экологических позиций, с оценки роли почвы в жизни растений и животных в настоящее время привлекает внимание широкой научной общественности. Экологический подход позволяет найти лучшее применение почвам региона, ландшафта, разработать систему использования и охраны этих почв. Количественная оценка такой функции почв как продуктивность (плодородие) позволяет сразу понять состояние почвы, особенности ее функционирования в данной системе (или агросистеме). Не менее важны санитарные функции почвы, которые почти не замечаются в естественных экосистемах, но их нарушение в урбаноэкосистемах приводят к весьма печальным последствиям (к распространению ряда заболеваний у человека и животных). Знание экологических функций почвы позволяет по-новому организовать земледелие, включая обработку почв и применение удобрений. Как показала практика, применение удобрений отнюдь не препятствует получению экологически чистых продуктов, если при этом учитывают характер функционирования агрофитоценоза и агроэкосистемы в целом. Оценка экологических функций опирается на знание

свойств почв (морфологических, химических, физических, биологических), и эта оценка позволяет почвоведом усилить практический аспект своей науки: использование почв в сельском хозяйстве, предотвращение эрозии, мелиорация почв – все основано на знании экологических функций почвы и регулировании их проявления. Следует отметить, что в естественных экосистемах набор экологических функций наиболее полный. В искусственных экосистемах часть экологических функций редуцирована, поэтому, человеку приходится самому выполнять эти функции вместо почвы, применяя обработку почв, внося удобрения, пестициды и т.п. Не будет преувеличением сказать, что формула: факторы-почва-экологические функции, использованная в этой книге, выражает главное: превращение горной породы, бесплодной до вхождения в экосистему, – в почву, обладающую набором необходимых для биосферы экологических функций. Появление у горной породы экологических функций – есть момент рождения почвы и превращения литосферы в биосферу. Использование в земледелии экологических функций почвы – основа благосостояния человека, основа его существования. Деградация почв – это прежде всего нарушение экологических функций почв, редуцирование их, снижение их эффективности. Именно нарушение функционирования почв позволяет заметить уже первоначальные признаки деградации почв. Учение об экологических функциях почв смыкается с представлениями ряда исследователей о почве как реакторе, в котором идут спонтанно всевозможные процессы, в целом обеспечивающие жизнь биосферы и антропосферы, реактора, экологические функции которого обеспечивают взаимодействие микроорганизмов, совокупности растений, животных и человека.

## ЛИТЕРАТУРА

- Аверьянов С.Ф., Юневич Д.П., Игнатьева В.М.* Глубокое осушение низинных болот // Гидротехника и мелиорация. 1960. № 5. С. 24–36.
- Адерихин П.Г., Шубина Д.И.* Пространственное варьирование свойств почв и продуктивность сельскохозяйственных растений внутри элементарного почвенного ареала // Структура почвенного покрова и ее значение для картирования почв, учета и использования почвенных ресурсов. Кишинев. 1980. С. 36–38.
- Азаров Б.Ф.* Симбиотический азот в земледелии Центрально-Черноземной зоны Российской Федерации: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1995.
- Алексахин Р.М.* Актуальные задачи в исследовании миграции радионуклидов в системе почва–растение // Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах. М., 1994. С. 3–10.
- Алексахин Р.М., Ратников А.Н., Жигарева Т.Л.* Мелиоративные мероприятия при радиоактивном загрязнении почв // Вестн. РАСХН. 1993. № 4.
- Алексеев В.А.* Световой режим леса. М.: Наука, 1975. 227 с.
- Аристовская Т.В.* Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
- Арнольди К.В., Арнольди Л.В.* О биоценозе как одном из основных понятий экологии, его структуре и объеме // Зоол. журн. 1963. Т. 42. С. 161–183.
- Бабьева И.П.* Научные основы составления банка информации о ценных свойствах дрожжей из природных источников. М., 1986. 25 с. (Тез. докл. итоговой конф. “МГУ – Главмикробиопром”).
- Бабьева И.П., Зенова Г.М.* Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 1989. 336 с.
- Базилевич Н.И.* Структура и функционирование наземных экосистем. М., 1986.
- Базилевич Н.И., Родин Л.Е., Розов Н.Н.* Географические аспекты изучения биологической продуктивности. Л., 1960. 1–27 с. (Материалы V съезда Геогр. о-ва СССР).
- Бараев А.И., Госсен Э.Ф.* Ветровая эрозия почв и борьба с ней в азиатской части СССР // Эрозия почв и борьба с ней. М.: Колос, 1980. С. 7–47.
- Барбер С.А.* Биологическая доступность питательных веществ в почве. М.: Агропромиздат, 1988. 376 с.
- Басманов А.С., Кузнецов А.В.* Экологическое нормирование применения удобрений в современном земледелии // Вестн. с.-х. науки. 1990. № 8.
- Бганцова В.А.* Влияние травянистых растений на свойства почвы в лесном БГЦ // Почвоведение. 1991. № 10. С. 60–78.
- Бельгард А.Л., Травлев А.П., Альбицкая Н.А., Белова Н.А.* К вопросу составления кадастров типов лесных БГЦ степной Украины // Региональные кадастры типов леса. М.: Наука, 1990. С. 91–99.
- Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К.* Экология. Особи, популяции и сообщества. Т. 1. М.: Мир, 1989. 667 с.
- Биохимия океана.* М.: Наука, 1983. 368 с.
- Бобров А.А.* К понятию микроареала у почвенных раковинных амёб // Изв. РАН. Сер. биол. 2003. № 1. С. 101–109.
- Бобров А.А., Гельцер Ю.Г.* Новый метод изучения раковинных амёб в ненарушенных образцах почвы in situ // Новые приборы, устройства, методики и технологические процессы, разработанные учеными МГУ. М.: Изд-во МГУ, 1982. С. 43.
- Бобров В.А., Кислинский А.И.* Урожайность зерновых культур на различных ком-

- понентах СПП Казахстана // Структура почвенного покрова и ее значение для картирования почв, учета и использования почвенных ресурсов. Кишинев, 1980. С. 39–40.
- Борисов В.А., Журавлев Н.Г., Разлукина М.А.* Повышение плодородия и фитосанитарного состояния почв в интенсивном овощеводстве // Вестн. с.-х. науки. 1990. № 1.
- Брауде И.Д.* Эрозия почв, засуха и борьба с ними в ЦЧО. М.: Наука, 1965. 140 с.
- Будыко М.И., Соколов А.А.* Водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. С. 545–553.
- Быков А.А., Мурзин Н.В.* Проблема анализа безопасности человека, общества, природы. СПб.: Наука, 1997. 247 с.
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высш. шк., 1973. 400 с.
- Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Коцеева И.Я.* Геохимическая роль гумусовых кислот в миграции элементов // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 97–117.
- Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Коцеева И.Я.* и др. Комплексообразование благородных металлов с фульвокислотами природных вод и геохимическая роль этих процессов // Аналитическая химия редких элементов. М.: Наука, 1988. С. 112–146.
- Василевич В.И.* Очерки теоретической фитоценологии. Л.: Наука, 1983. 247 с.
- Ведрова Э.Ф.* Влияние сосновых насаждений на свойства почв. Новосибирск. Наука, 1980. 102 с.
- Веклич М.Ф.* Палеопедология – наука о древнем почвообразовании // Палеопедология. Киев: Наук. думка, 1974. С. 3–14.
- Величко А.А., Морозова Т.Д.* Изменение природной среды в позднем плейстоцене по данным изучения лессов, криогенных явлений, ископаемых почв и фауны // Палеогеография Европы за последние сто тысяч лет. М.: Наука, 1982. С. 115–120.
- Вернадский В.И.* К вопросу о химическом составе почв // Почвоведение. 1913. № 2/3.
- Вернадский В.И.* Биогеохимические очерки. М.; Л., 1940. 250 с.
- Вернадский В.И.* Биосфера: (1-изд. М., 1926) // Избр. соч. М.: Изд-во АН СССР, 1960а. Т. 5: Биосфера. С. 99.
- Вернадский В.И.* Об условиях появления жизни на Земле (1931 г.) // Избр. соч. М.: Изд-во АН СССР, 1960б. Т. 5. С. 252–266.
- Вернадский В.И.* Размышления натуралиста. М.: Мысль, 1977. 191 с.
- Вернадский В.И.* Проблемы биогеохимии. М.: Наука, 1980. 250 с.
- Взаимодействие почвенного и атмосферного воздуха / Под ред. Б.Г. Розанова. М.: Изд-во МГУ, 1985. 108 с.
- Викторов С.В., Ремезова Г.Л.* Индикационная геоботаника. М.: Изд-во МГУ, 1988. 168 с.
- Вильямс В.Р.* Развитие первичного почвообразовательного процесса // Почвоведение. М.: Сельхозгиз, 1951. С. 284. (Собр. соч.; Т. 6).
- Виноградов А.П.* Геохимия живого вещества. Л., 1932.
- Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 5.
- Возняковская Ю.М.* Микрофлора растений и урожай. Л.: Колос, 1969. 239 с.
- Возняковская Ю.М.* Взаимоотношения растений с микроорганизмами ризосферы и филлосферы // Агрономическая микробиология. Л.: Колос, 1976. С. 144–179.
- Войтович Н.В.* Плодородие почвы Черноземной зоны и его моделирование. М.: Колос, 1997.
- Волкова Н.И., Жучкова В.К., Николаева В.А.* Рекомендации к ландшафтному обоснованию природоохранных систем земледелия. М., 1990. 61 с.
- Волобуев В.Р.* Введение в энергетику почвообразования. М., 1974.
- Волощук М.Д.* Реконструкция склоновых земель, пораженных оврагами. Кишинев: Картя молдовеняскэ, 1986. 265 с.
- Воробьева Л.А.* Лекции по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1987. 86 с.
- Всеволодова-Перель Т.С., Карпачевский Л.О.* О роли сапрофагов в формировании лесной подстилки // Лесоведение. 1987. № 1. С. 28–32.
- Всемирная хартия почв // Почвоведение. 1983. № 7. С. 7–11.
- Гаранжа А.П., Коновалов Г.С.* Метод выделения коллоидной формы миграции микроэлементов // Второе Всесоюз. совещ. по методам анализа природ. и сточ. вод. М.: ГЕОХИ, 1977.
- Гаузе Г.Ф.* Лекции по антибиотикам. М.: Медгиз, 1958. 252 с.
- Геннадиев А.Н.* Почвоохранная политика и фермерское земледелие в США // Почвоведение. № 4. С. 522–528.
- Герасимов И.П.* Мировая почвенная карта и общие законы географии почв // Там же. 1945. № 3–4.
- Герасимов И.П.* Методологические проблемы экологизации современной науки // Философия, естествознание, современность. М., 1981.



- Гиличинский Д.А., Хлебникова Г.М., Звягинцев Д.Г.* и др. Микробиологические характеристики при изучении осадочных пород криолитозоны // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 6. С. 103–115.
- Гильманов Т.Г., Базилевич Н.И.* Построение и анализ моделей экосистем // Вопросы географии. М., 1986. Вып. 127.
- Гиляров М.С.* Особенности почвы как среды обитания и ее значение в эволюции насекомых. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1949. С. 280.
- Гиляров М.С.* Зоологический метод диагностики почв. М.: Наука, 1965. 268 с.
- ✓ *Гиляров М.С.* Почвенный ярус биоценозов суши // Успехи соврем. биологии. 1968. Т. 66, № 1. С. 121–135.
- Гиляров М.С.* Условия обитания беспозвоночных животных разных размерных групп в почве // Методы почвенно-зоологических исследований. М.: Наука, 1975. С. 7–11.
- Гиляров М.С.* Учет крупных беспозвоночных (мезофауна) // Количественные методы в почвенной зоологии. М.: Наука, 1987. С. 9–26.
- Гиляров М.С., Криволицкий Д.А.* Жизнь в почве. М.: Молодая гвардия, 1985.
- Глазовская М.А.* Влияние микроорганизмов на процессы выветривания первичных минералов // Изв. АН КазССР. Сер. почв. 1950. Вып. 6.
- Глазовская М.А.* Почвы мира. Т. 2. География почв. М.: Изд-во МГУ, 1973. 427 с.
- Глазовская М.А.* Биогенное накопление и возможные превращения химических элементов в почвах: (Факты и гипотезы) // Почвоведение. 1974. № 6. С. 3–16.
- Глазовская М.А.* Общее почвоведение и география почв. М.: Высш. шк., 1981. 400 с.
- Глазовская М.А.* Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 101.
- Глазовская М.А., Добровольская Н.Г.* Геохимические функции микроорганизмов. М.: Изд-во МГУ, 1984. 152 с.
- Глазовская М.А., Фридланд В.М.* Принципы составления почвенной карты мира для высших учебных заведений // Почвоведение. 1978. № 3. С. 5–17.
- Годельман Я.М.* Неоднородность почвенного покрова и использование земель. М.: Наука, 1981. 200 с.
- Горбачев В.Н., Попова Э.П.* Лесорастительные свойства почв Енисейского кряжа // Лесоведение. 1985. № 2. С. 3–9.
- Горбенко А.Ю.* Материальный баланс и динамика роста почвенных микроорганизмов в агробиогеоценозе: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1986.
- Горбенко А.Ю., Паников Н.С., Звягинцев Д.Г.* Периодичность роста микроорганизмов в почве и ее причины // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289, № 4. С. 984.
- Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
- Гордеев В.В.* Черты геохимии речного стока в океан // Литология и полез. ископаемые. 1984. № 5. С. 29–50.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П.* Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов речным осадочным материалом // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238, № 1.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П.* Микроэлементы // Химия океана. М.: Наука, 1979. (Океанология; Т.1).
- Государственный доклад "О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1992 г.", ("Белая книга") // Зеленый мир: Газета. 1993. № 23(135); Спецвыпуск. С. 5–12.
- Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель Российской Федерации за 1994, 1995 гг. / Ком. РФ по земельным ресурсам и землеустройству. М., 1996. 130 с.
- Григорьев Г.И., Шубина И.Г.* Элементарные структуры почвенного покрова поймы среднего течения р. Москвы // Картография почв и структура почвенного покрова. М., 1980.
- Гричук В.П.* Растительность Европы в позднем плейстоцене // Палеогеография Европы за последние 100 тысяч лет. М.: Наука, 1982. С. 92–109.
- Гришина Л.А., Васильевская В.Д., Самойлова Е.М.* Типы биологического круговорота в некоторых природных зонах СССР // Почвы и биол. продуктивность. 1976. Вып. 3. С. 1–183.
- Гришина Л.А., Копчик Г.Н., Макаров М.И.* Трансформация органического вещества почв. М.: Изд-во МГУ, 1990. 88 с.
- Грищенко О.М.* Калорийность фитомассы растительных сообществ северного Прикаспия // Экология. 1981. № 3. С. 24–28.
- Гузев В.С., Бондаренко Н.Г., Бызов Б.Я.* и др. Структура иницированного микробного сообщества как интегральный показатель оценки микробиологического состояния почвы // Микробиология. 1980. Т. 49, № 1. С. 134–140.
- Гусев М.В., Никитин К.А.* Цианобактерии: (Физиология и метаболизм). М.: Наука.
- Демина Л.Л., Гордеев В.В., Фомина Л.С.* Формы железа, марганца, цинка и меди в

- речной воде и их изменения в зоне смешения речных вод с морскими (на примере рек бассейнов Черного, Каспийского и Азовского морей) // Геохимия. 1978. № 8.
- Демина Л.Л., Фомина Л.С.* О формах нахождения Fe, Mn, Cu и Zn в поверхностной взвеси вод Тихого океана // Там же. 1978. № 11.
- Дергачева М.И.* Органическое вещество почв: Статика и динамика. Новосибирск: Наука, 1984. 314 с.
- Дергачева М.И.* Система гумусовых веществ почв. Новосибирск: Наука, 1989. 110 с.
- Динесман Л.Г.* Голоценовая история биогеоценозов Русской равнины в позднем антропогене // История биогеоценозов СССР в голоцене. М.: Наука, 1976.
- Дмитриев Е.А.* Методические и генетические аспекты исследования границ между почвами в почвенном покрове // Структура почвенного покрова и ее значение для картирования почв, учета и использования почвенных ресурсов. Кишинев, 1980. С. 8–10.
- Дмитриев Е.А., Карпачевский Л.О., Строганова М.Н.* О происхождении неоднородностей почвенного покрова в лесных биогеоценозах // Проблемы почвоведения. М., 1978.
- Дмитриев Е.А., Самсонова В.П.* Квазипериодичность в изменении некоторых свойств дерново-подзолистой почвы под ельником // Биол. науки. 1979. № 4. С. 92–97.
- Добровольская Н.Г.* Опыт использования почвенно-эрозийных карт для экологической оценки эрозии почв // Тез. докл. Междунар. конф. "Проблемы антропогенного почвообразования". М., 1997. Т. 2. С. 82–84.
- Добровольская Т.Г., Лысак Л.В., Звягинцев Д.Г.* Почвы и микробное разнообразие // Почвоведение. 1996. № 6. С. 699–705.
- Добровольский Г.В., Шоба С.А.* Растровая электронная микроскопия. М.: Изд-во МГУ, 1978. 144 с.
- Добровольский В.В.* География и палеогеография коры выветривания СССР. М.: Мысль, 1969.
- Добровольский Г.В.* Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: Изд-во МГУ, 1968.
- Добровольский Г.В.* Разнообразие генезиса и функций почв // Почвоведение. 1993. № 9. С. 5–12.
- Добровольский Г.В.* Биосферно-экологическое значение почв // Плодородие почвы и качество продукции при биологизации земледелия. М.: Колос, 1996. С. 5–10.
- Добровольский Г.В.* Тихий кризис планеты // Вестн. РАН. 1997. Т. 67, № 4. С. 313–320.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Экологические функции почв. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Функции почв в биосфере и экосистемах: (Экологическое значение почв). М.: Наука, 1990. 261 с.
- Добровольский Г.В., Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Задачи почвенного мониторинга // Почвоведение. 1983. № 11.
- Добровольский Г.В., Розов Н.Н., Урусевская И.С.* Принципы составления карты почвенно-географического районирования СССР для высшей школы // Биол. науки. 1981. № 1. С. 88–94.
- Добровольский Г.В., Урусевская И.С., Шоба С.А.* Роль геолого-геоморфологических факторов в генезисе и географии почв равнин СССР // Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1990. С. 105–114.
- Докучаев В.В.* Доклад об оценке земель вообще и Закавказья в особенности. Почвенные горизонты и вертикальные зоны (1898) // Соч. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1949. Т. 6.
- Дорст Д.* До того как умрет природа. М.: Прогресс, 1968. 129 с.
- Дояренко А.Г.* Факторы жизни растений. М.: Колос, 1966. 278 с.
- Дроздов А.В.* Продуктивность зональных наземных растительных сообществ и показатели водно-теплового режима территории // Общие теоретические проблемы биологической продуктивности. Л.: Наука, 1969. С. 33–38.
- Дунгер В.* Учет микроартропод (микрофауна) // Количественные методы в почвенной зоологии. М.: Наука, 1987. С. 26–51.
- Дылис Н.В.* Структура лесного биогеоценоза. М., 1969. (Комаровские чтения; 21).
- Дювиньо П., Танг М.* Биосфера и место в ней человека. М.: Прогресс, 1968.
- Дюшофур Ф.* Основы почвоведения. М.: Прогресс, 1970. 591 с.
- Егоров Н.С.* Основы учения об антибиотиках. М.: Высш. шк., 1969. 437 с.
- Емельянов Е.М.* Формирование химического состава взвеси бассейна Атлантического океана (по данным изучения Fe, Al, Ti, Mn) // Геохимия. 1977. № 4.
- Ефремов Д.Ф., Карпачевский Л.О., Сапожников А.П., Воронин А.Д.* О классификации водного режима почв и лесных местобитаний // Почвоведение. 1986. № 3. С. 129–137.

- Заварзин Г.А.* // Микробиология. 1997. Т. 66, № 6. С. 725–734.
- Заварзин Г.А.* Микробиологическая конверсия органических веществ в топливо // Преобразование солнечной энергии. М.: Наука, 1985. С. 134–141.
- Заварзин Г.А.* Смена парадигмы в биологии // Вестн. РАН. 1995. № 1. С. 8–17.
- Заварзин Г.А., Карнов Г.А., Горленко М.В.* и др. Кальдерные микроорганизмы. М.: Наука, 1989. 12 с.
- Заварзин Г.А., Крылов И.Н.* Цианобактериальные сообщества – колодец в прошлое // Природа. 1983. № 3. С. 59–69.
- Зайдельман Ф.Р.* Глубокое осушение низинных болот // Гидротехника и мелиорация. 1960. № 11. С. 25–31.
- Зайдельман Ф.Р.* Подзоло- и глееобразование. М.: Наука, 1974. 208 с.
- Зайдельман Ф.Р.* Нужна ли мелиорация народному хозяйству страны? // Вестн. с.-х. науки. 1989. № 12. С. 18–26.
- Зайдельман Ф.Р.* Эколого-мелиоративное почвоведение гумидных ландшафтов. М.: Агропромиздат, 1991. 320 с.
- Зайдельман Ф.Р.* Естественное и антропогенное переувлажнение почв. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 288 с.
- Зайдельман Ф.Р.* Глееобразование – глобальный почвообразовательный процесс // Почвоведение. 1994. № 4. С. 21–31.
- Зайдельман Ф.Р.* Мелиорация почв. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1996. 382 с.
- Зайдельман Ф.Р., Давыдова И.Ю.* Причины ухудшения химических и физических свойств черноземов при орошении неминерализованными водами // Почвоведение. 1989. № 11. С. 101–108.
- Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С.* Изменение свойств легких почв Окско-Мещерского полесья под влиянием осушения и окультуривания // Вестн. МГУ. Сер. 17, Почвоведение. 1995. № 2. С. 11–16.
- Зайдельман Ф.Р., Шваров А.П., Павлова Е.Б., Головин С.Н.* Скорость биохимического разложения органического вещества осушенных торфяных почв при разных способах пескования // Почвоведение. 1997. № 9. С. 1148–1157.
- Заславский М.Н.* Эрозиоведение как теоретическая основа почвозащитного земледелия // Актуальные вопросы эрозиоведения. М.: Колос, 1984. С. 14–40.
- Звягинцев Д.Г.* Адсорбция почвами микроорганизмов и ее влияние на их жизнедеятельность: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1969. 48 с.
- Звягинцев Д.Г.* Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М.: Изд-во МГУ, 1973. 174 с.
- Звягинцев Д.Г.* Проблемы биохимии почв // Вестн. МГУ. Сер. 17, Почвоведение. 1977. № 1.
- Звягинцев Д.Г.* Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978а. № 6.
- Звягинцев Д.Г.* Некоторые концепции строения и функционирования комплекса почвенных микроорганизмов // Вестн. МГУ. Сер. 17, Почвоведение. 1978б. № 4.
- Звягинцев Д.Г.* Газовая фаза почвы и микроорганизмы: Роль микроорганизмов в круговороте газов в природе. М.: Наука, 1979. 92 с.
- Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М., 1980а.
- Звягинцев Д.Г.* Современные проблемы экологии почвенных микроорганизмов // Микробиология окружающей среды. Алма-Ата, 1980б. С. 65–79.
- Звягинцев Д.Г.* Проблемы молекулярной биологии в современном почвоведении // Почвоведение. 1985. № 3.
- Звягинцев Д.Г.* Почва и микроорганизмы. М.: Изд-во МГУ, 1987. 256 с.
- Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Добровольская Т.Г.* и др. Вертикально-ярусная организация микробных сообществ лесных биогеоценозов // Микробиология. 1993. Т.62, № 1. С. 5–36.
- Звягинцев Д.Г., Воробьева Е.А., Гончарук Л.М., Андреева Т.А.* Сравнительная характеристика активности почв вертикальных зон // Проблемы и методы биологической диагностики почва. М., 1976.
- Звягинцев Д.Г., Гилччинский Д.А., Благодатский С.А.* и др. Длительность сохранения микроорганизмов в постоянно мерзлых осадочных породах и погребенных почвах // Микробиология. 1985. Т. 54, № 1. С. 155–161.
- Звягинцев Д.Г., Голимбет В.Е.* Биомасса микробов в почве и их активность // С.-х.биология. 1983а. № 2.
- Звягинцев Д.Г., Голимбет В.Е.* Динамика микробной численности, биомассы и продуктивности микробных сообществ в почвах // Успехи микробиологии. 1983б. Т. 18.
- Звягинцев Д.Г., Кириллова Н.П., Кочкина Г.А., Полянская Л.М.* Методы изучения микробных сукцессий в почве // Микроорганизмы как компонент биогеоценоза. М., 1984а.
- Звягинцев Д.Г., Кожевин П.А.* Изучение динамики популяции *Rhizobium legumi-*

- posatum с помощью иммунолюминесценции // Микробиология. 1974. Т. 43, № 6.
- Звягинцев Д.Г., Кожевин П.А., Малахов В.В.* Экологические проблемы в почвенной микробиологии // Журн. общ. биологии. 1976. Т. 37.
- Звягинцев Д.Г., Кочкина Г.А., Кожевин П.А.* Новые подходы к изучению сукцессий микроорганизмов в почве // Почвенные организмы как компонент биогеоценоза. М., 1984б.
- Звягинцев Д.Г., Лукин С.А., Лисичкина Г.А., Кожевин П.А.* Способ более полного количественного учета микроорганизмов в почве // Микробиология. 1984. Т. 53, № 4.
- Звягинцев Д.Г., Мирчинк Т.Г.* О природе гуминовых кислот // Почвоведение. 1986. № 5. С. 68–75.
- Зенова Г.М.* Роль метаболитов во взаимодействиях микроорганизмов в ассоциациях природных экосистем // Экологическая роль микробных метаболитов. М.: Изд-во МГУ, 1986. С. 166–177.
- Зенова Г.М., Штина Э.Л.* Почвенные водоросли. М.: Изд-во МГУ, 1990. 80 с.
- Зимовец Б.А., Зайдельман Ф.Р., Панкова Е.И., Бойко С.В.* Экологическая концепция мелиорации почв // Почвоведение. 1993. № 6. С. 71–78.
- Зонн С.В.* Почва как компонент лесного биогеоценоза // Основы лесной биогеоценологии. М., 1964.
- Зонн С.В.* Современные проблемы генезиса и географии почв. М.: Наука, 1983.
- Зонн С.В., Карпачевский Л.О.* Проблемы лесного почвоведения и современные методы лесорастительной оценки почв // Почвоведение. 1987. № 9. С. 6–15.
- Иванушкина К.Б., Карпачевский Л.О.* Изменчивость содержания и состава гумуса дерново-подзолистых почв в пределах биогеоценоза // Там же. 1969. № 2. С. 58–65.
- Иенни Г.* Факторы почвообразования. М., Изд. иностранной литературы, 1948. 347 с.
- Ильина Л.С., Карпачевский Л.О., Щеголькова Н.М.* Теория буроземообразования и бурые лесные почвы Сихотэ-Алиня // Почвообразование в лесных БГЦ. М.: Наука, 1989. С. 12–21.
- Иллетдинов А.Н.* Микробиологические превращения металлов. Алма-Ата: Наука КазССР, 1984. 267 с.
- Камшилов М.М.* Эволюция биосферы. М.: Наука, 1974. С. 76.
- Каравайко Г.И. (ред.)* Биотехнология металлов. М.: Центр Междунар. проектов ГКНТ, 1989, 375 с.
- Каратыгин И.В.* Козволюция грибов и растений. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 115 с.
- Карпачевский Л.О.* Пестрота почвенного покрова в лесных биогеоценозах. М.: Изд-во МГУ, 1977. 312 с.
- Карпачевский Л.О.* Лес и лесные почвы // М.: Лесн. пром-сть. 1981. 264 с.
- Карпачевский Л.О.* Экологическое почвоведение. М.: Изд-во МГУ, 1993. 184 с.
- Карпачевский Л.О.* Динамика свойств почвы. М.: Геос, 1997.
- Карпачевский Л.О., Смирнова Л.Ф., Травлев А.П. и др.* Лесные почвы степей // Лесоведение. 1995. № 4. С. 52–62.
- Карпачевский Л.О., Травлев А.П.* Лесные почвы и сylvатизация ландшафта // Почвоведение. 1991. № 4. С. 12–18.
- Карпова Е.А., Потатуева Ю.А.* Кадмий в почвах, растениях и удобрениях // Химия в сел. хоз-ве. 1998. № 2.
- Карта радиационной обстановки на территории европейской части СССР по состоянию на декабрь 1990 г.: (Плотность загрязнения местности цезием – 137). Минск: ГУГК СССР, 1991.
- Кац Л.И.* Палеомикробиология: Проблемы и перспективы // Успехи микробиологии. М.: Наука, 1990. Т. 24. С. 194–220.
- Кацтанов А.Н.* Защита почв от ветровой и водной эрозии. М.: Россельхозиздат. 1974. 208 с.
- Кацтанов А.Н., Лисецкий Ф.Н., Швэбе Г.И.* Основы ландшафтно-экологического земледелия. М.: Колос, 1994. 126 с.
- Кацтанов А.Н., Щербаков А.П. (ред.)*. Ландшафтное земледелие. Ч. 1. Концепция формирования высокопродуктивных экологически устойчивых агроландшафтов и совершенствование систем земледелия на ландшафтной основе. Курск, 1993а. 100 с.
- Кацтанов А.Н., Щербаков А.П. (ред.)*. Ландшафтное земледелие. Ч. 2. Методические рекомендации по разработке ландшафтных систем земледелия в многоукладном сельском хозяйстве. Курск, 1993б. 54 с.
- Квасников Е.И., Писарчук Е.Н.* Артробактер в природе и производстве. Киев: Наук. думка, 1980. 99 с.
- Кирюшин В.И.* Концепция адаптивно-ландшафтного земледелия. Пушкино, 1993. 64 с.
- Кирюшин В.И.* Методика разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия и технологий возделывания сельскохозяйственных культур. М., 1995. 79 с.
- Кирюшин В.И. и др.* Концепция оптимизации режима органического вещества

- почв в агроландшафтах. М.: МСХА, 1993. 95 с.
- Коваленко Л.В.* Биологическая активность дерново-подзолистой тяжело-суглинистой почвы при систематическом внесении средств химизации // Докл. ВАСХНИЛ. 1988. № 7.
- Ковда В.А.* Основы учения о почвах. М.: Наука, 1973. Т. 1–2.
- Ковда В.А.* Биогеохимический круговорот и почвообразование // Биологический круговорот и процессы почвообразования. Пушино, 1984.
- Ковда В.А.* Роль и функции почвенного покрова в биосфере Земли. Пушино: ОНТИ НЦБИ, 1985. 10 с.
- Ковда В.А., Лобова Е.В.* Почвенная карта мира в масштабе 1 : 10 000 000 // Тр. X Междунар. конгр. почвоведов. М., 1974. Т. 8. С. 20–28.
- Кожевин П.А.* Микробные популяции в природе. М.: Изд-во МГУ, 1989. 175 с.
- Кожевин П.А., Кожевина Л.С., Полянская Л.М.* Экологическая роль антибиотиков // Экологическая роль микробных метаболитов. М., 1986. С. 57–65.
- Колчинский Э.И.* Эволюция биосферы. Л.: Наука, 1990.
- Кондратьева Е.Н.* Автотрофные прокариоты. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.
- Корганова Г.А.* Адаптационные особенности почвообитающих раковинных амёб (Protozoa, Testacida) // Адаптация почвенных животных к условиям среды. М.: Наука, 1977. С. 82–101.
- Корганова Г.А.* Методы количественного учета почвенных простейших (нанофауна) // Количественные методы в почвенной зоологии. М.: Наука, 1987. С. 58–72.
- Корганова Г.А.* Почвенные раковинные амёбы (Protozoa, Testacea): фауна, экология, принципы организации сообществ. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1997. 46 с.
- Коссович П.А.* О круговороте серы и хлора на земном шаре и о значении этого процесса в природе, почве и культуре сельскохозяйственных растений. СПб., 1913. 86 с.
- Костина Е.Е.* Глобальное изменение климата и его возможные последствия: Обзор. Владивосток: Дальнаука, 1997. 103 с.
- Кочкина Г.А.* Сукцессии почвенных микроорганизмов и место в них конкретных микробных популяций: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1981. 24 с.
- Красильников Н.А.* Микроорганизмы почвы и высшие растения. М., 1958. 462 с.
- Криволицкий Д.А.* Индикационная зоология // Природа. 1985. № 7. С. 86–91.
- Криволицкий Д.А.* Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994.
- Криштофович А.Н.* Эволюция растений по данным палеоботаники // Проблемы ботаники. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. Т. 1.
- Круглов Ю.В.* Микробиологические аспекты охраны почв от загрязнения пестицидами // Микроорганизмы в сельском хозяйстве. Тез. докл. III Всесоюз. науч. конф. М., 1986. С. 20.
- Крупеников И.А.* Сохраним и приумножим: (Рассказы об охране почв). Кишинев: Карта молдовеняскэ, 1985. 136 с.
- Крупеников И.А.* Не станет почвы – не станет и биосферы, а она – колыбель человечества // Сел. хоз-во Молдавии. 1989. № 8. С. 33–35.
- Крупеников И.А.* Почвенный покров и эрозия // Экологические аспекты защиты почв от эрозии. Кишинев: Молдагроинформреклама, 1990. С. 4–16.
- Кузнецов М.С., Глазунов Г.П.* Эрозия и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 334 с.
- Кузнецов М.С., Литвин Л.Ф., Ким А.Д.* и др. Оценка опасности эрозии почв в загрязненных районах Тульской области // Вестн. МГУ, Сер. 17, Почвоведение. 1994. № 3. С. 17–29.
- Кузнецов М.С., Пушкарева М.М., Флесс А.Д.* и др. Прогноз интенсивности водной эрозии и миграции радионуклидов в загрязненных районах Брянской области // Почвоведение. 1995. № 5. С. 617–625.
- Курмышева Н.А., Ефремов В.Ф., Трофимова Н.П.* Значение систем удобрений и севооборотов в регулировании гумусового режима дерново-подзолистой почвы в условиях интенсивного земледелия // Агрохимия. 1996. № 12.
- Лазарев В.И.* Динамика эффективного плодородия типичного чернозема в различных агроэкосистемах в условиях Курской области // Там же. 1977. № 6.
- Либих Ю.* Химия в приложении к земледелию и физиологии. М.; Л.: ОГИЗ: Сельхозгиз, 1936. 85 с.
- Лисицын А.П.* Осадкообразование в океанах: Количественное распределение осадочного материала. М.: Наука, 1974.
- Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978.
- Лисичкина Г.А.* Динамика численности клубеньковых бактерий сои в ризоплане и ризосфере растений и в почве: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 24 с.
- Лозина-Лозинский Л.К.* К вопросу об анабиозе микроорганизмов при высушива-

- нии и промораживании // Экспериментальный анабиоз: (Тез. докл. II Всесоюз. конф. по анабиозу). Рига, 1984. С. 22.
- Магда Миргани М.* Структура комплексов почвенных микроорганизмов в процессе сукцессии на примере почв Судана: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1986. 26 с.
- Марков К.К.* Палеогеография. М.: Изд-во МГУ, 1960. С. 222–228.
- Марфенина О.Е.* Микробиологические аспекты охраны почв. М.: Изд-во МГУ, 1990. 120 с.
- Марфенина О.Е., Макарова Н.А.* Комплекс почвенных микроорганизмов как показатель восстановления рекреационно нарушенных // Биол. науки. 1984. № 9. С. 99–104.
- Марфенина О.Е., Попова Л.В.* Изменение комплексов почвенных микроскопических грибов при пастбищной дигрессии горных биогеоценозов // Там же. 1988. № 9. С. 96–101.
- Медведев В.В.* Оптимизация агрофизических свойств черноземов. М.: Агропромиздат, 1988. 160 с.
- Метлицкий О.З.* Экологические и технологические основы обнаружения нематод // Принципы и методы экологической фитонематологии. Петрозаводск: Карелия, 1985. С. 18–34.
- Методические рекомендации по проектированию комплексов противозерозионных мероприятий на расчетной основе. Курск, 1985. 33 с.
- Микробиологическая деструкция органических остатков в биогеоценозе: Тез. докл. Всесоюз. совещ. М., 1987. 95 с.
- Микробиология окружающей среды / Под. ред. А.Н. Илялетдинова. Алма-Ата: Наука, КазССР, 1980. 150 с.
- Микроорганизмы и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 1989. 203 с.
- Микроорганизмы как компонент биогеоценоза / Под ред. Е.Н. Мишустина. М.: Наука, 1984. 160 с.
- Мина В.Н.* Выщелачивание некоторых веществ атмосферными осадками из древесных растений // Почвоведение. 1965. № 6.
- Мина В.Н.* Влияние осадков, стекающих по стволам деревьев на почву // Там же. 1967. № 10.
- Минеев В.Г.* Агрехимия и биосфера. М.: Колос, 1984.
- Минеев В.Г.* Агрехимия. М.: Изд-во МГУ, 1990.
- Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрехимии в современном земледелии // Agricultural sciences in the context of European integration. Olsztin, 1995. Т. 1/4.
- Минеев В.Г., Гомонова Н.Ф., Дурьнина Е.П.* и др. Изменение биоразнообразия в агроэкосистеме при длительном антропогенном воздействии // Докл. РАСХН. 1997. № 4.
- Минеев В.Г., Ремпе Е.Х.* Агрехимия, биология и экология почвы. М.: Росагропромиздат, 1990. 206 с.
- Минеев В.Г., Ремпе Е.Х.* Эколого-биологическая оценка применения средств химизации на разных типах почв // Почвоведение. 1995. № 8.
- Минеев В.Г., Дебрецени Б., Мазур Т.* Биологическое земледелие и минеральные удобрения. М.: Колос, 1993.
- Миркин Б.М.* Теоретические основы современной фитоценологии. М.: Наука, 1985. 127 с.
- Миркин Б.М., Розенберг Г.С.* Фитоценология: Принципы и методы. М.: Наука, 1978. 212 с.
- Миркин Б.М., Розенберг Г.С., Наумова Л.Г.* Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М.: Наука, 1989. 223 с.
- Мирчинк Т.Г.* Почвенная микология. М.: Изд-во МГУ, 1988. 220 с.
- Мишустин Е.Н.* Ассоциации почвенных микроорганизмов. М., 1975.
- Мишустин Е.Н., Емцев В.Т.* Микробиология. М.: Агропромиздат, 1987. 368 с.
- Мишустин Е.Н., Перцовская А.Л., Горбов В.А.* Санитарная микробиология. М.: Наука, 1979. 304 с.
- Моавад Х., Бабьева Н.П., Горин С.Е.* Агрегация почв под действием внеклеточного полисахарида *Lipomyces lipofer* // Почвоведение. 1976. № 9. С. 65–68.
- Моисеев Н.Н., Крапивин В.Ф., Свирижев Ю.М., Тарко А.М.* На пути к построению модели динамических процессов в биосфере // Вестн. АН СССР.
- Моткин Г.А.* Основы экологического страхования. М.: Наука, 1996. 192 с.
- Никитин Д.И.* Применение электронной микроскопии для изучения почвенных суспензий // Почвоведение. 1964. № 6.
- Никитин Д.И.* Роль микроорганизмов в образовании и удалении этилена // Роль микроорганизмов в круговороте газов в природе. М.: Наука, 1979. С. 241–254.
- Никитин Д.И., Никитина Э.С.* Процессы самоочищения окружающей среды и паразиты бактерий. М.: Наука, 1978. 205 с.
- Ниценко Л.А.* О некоторых спорных вопросах теории геоботаники // Ботан. журн. 1963. Т. 48. С. 486–501.
- О государственной комплексной программе повышения плодородия почв России. Постановление Правительства Российской

- Федерации от 17 ноября 1992 г. № 879 "О мерах по предотвращению деградации почв с целью снижения угрозы национальной безопасности" // Экологическая безопасность России. М.: Юрид. лит., 1995. Вып. 1. С. 93–103.
- О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1995 г. (Государственный доклад) // Зеленый мир: Газета М-ва охраны окружающей среды и природ. ресурсов. 1996. № 24. С. 6
- Обухов А.И., Плеханова Н.О.* Детоксикация дерново-подзолистых почв, загрязненных тяжелыми металлами: Теоретические и практические аспекты // *Агрохимия*. 1995. № 2.
- Одум Е.* Основы экологии. М.: Мир, 1975.
- Одум Ю.* Экология. М., 1986. Т. 1, 2.
- Опарин А.И.* Возникновение жизни на земле. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
- Опарин А.И.* Жизнь и ее природа, происхождение и развитие. М.: Недра, 1967. 343 с.
- Орехова Н.П.* Годовая динамика фосфора и калия в дерново-подзолистой модельной почве под древесными породами // *Вестн. МГУ. Сер. 17, Почвоведение*. 1978. № 1.
- Орешкина Н.С.* Статистические оценки пространственной изменчивости свойств почв. М.: Изд-во МГУ, 1983. 112 с.
- Орлов Д.С.* Кинетическая теория гумификации и схема вероятного строения гуминовых кислот // *Биол. науки*. 1977. № 9. С. 5–16.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.
- Орлова В.К., Родионов В.С., Флесс А.Д.* Особенности и темпы эрозии пахотных земель во время снеготаяния // *Работа водных потоков*. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 55–60.
- Парфенова Е.И., Ярилова Е.А.* Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. М.: Наука, 1977. 198 с.
- Почвенно-биогеоценотические исследования в лесных биогеоценозах. М.: Изд-во МГУ, 1980. 160 с.
- Палеопедология. Киев: Наук. думка, 1974. 215 с.
- Панчишкина М.Б.* Динамика различных бактериальных популяций в почвах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1987. 25 с.
- Пачепский Я.А.* Математические модели процессов в мелиорируемых почвах. М.: Изд-во МГУ. 1992. 85 с.
- Пачепский Я.А.* Математические модели физико-химических процессов в почвах. М.: Наука, 1990. 188 с.
- Перельман А.И.* Геохимия. М., 1989.
- Петров В.П.* Основы учения о древних корках выветривания. М.: Недра, 1967. 343 с.
- Петров В.П.* О классификационном положении осушенных почв сельскохозяйственных угодий // *Тез. докл. VIII Всесоюз. съезда почвоведов*. Новосибирск, 1989. С. 92.
- Покаржевский А.Д.* Геохимическая экология наземных животных. М.: Наука, 1985.
- Польнов Б.Б.* Первые стадии почвообразования на массивно-кристаллических породах // *Почвоведение*. 1945. № 7. С. 327–339.
- Польнов Б.Б.* К вопросу о роли элементов биосферы в эволюции организмов // *Там же*. 1948, № 3. С. 594–607.
- Польнов Б.Б.* Геологические и биологические циклы в почвообразовании // *Избр. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1956а*. С. 284–287.
- Польнов Б.Б.* Руководящие идеи современного учения об образовании почв // *Там же*. 1956б. С. 423, 425.
- Полянская Л.М.* Популяция *Streptomyces olivocinereus* в почвах разных типов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1978. 26 с.
- Полянская Л.М.* Микробная сукцессия в почве: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1996.
- Полянская Л.М., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г.* Микробная биомасса в почвах // *Докл. РАН*. 1995. Т. 344, № 6. С. 846–848.
- Полянская Л.М., Мирчинк Т.Г., Кожевин П.А., Звягинцев Д.Г.* Изменение структуры комплекса микромицетов в ходе микробных сукцессий в почве // *Микробиология*. 1990. Т. 59, № 2. С. 349–354.
- Пономаренко А.Г.* Наземные беспозвоночные // *Природа*. 1989. № 5. С. 20–23.
- Попова А.А.* Влияние минеральных и органических удобрений на состояние тяжелых металлов в почве // *Агрохимия*. 1991. № 3.
- Попова Э.П.* Азот в лесных почвах. Новосибирск, 1983. 132 с.
- Почвенно-агрохимическая характеристика АБС "Чашниково". Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1986. 93 с.
- Почвенно-географическое районирование СССР (в связи с сельскохозяйственным использованием земель) М.: Изд-во АН СССР, 1962. 422 с.
- Почвенно-географическое районирование СССР: (Карта масштаба 1 : 8 000 000 для

- высших учебных заведений). М.: ГУГК, 1983.
- Почвенно-экологический мониторинг / Под ред. Д.С. Орлова и В.Д. Васильевской. М.: Изд-во МГУ, 1994. 272 с.
- Почвенные организмы как компонент биогеоценоза / Под ред. Е.Н. Мишустина. М.: Наука, 1984. 246 с.
- Пошон Ж., Баржак Г. де. Почвенная микробиология. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 547 с.
- Примак И.Д., Урсулов В.Ф. Динамика питательных веществ в мощном черноземе под влиянием удобрений // Докл. ВАСХНИЛ. 1989. № 2.
- Прищеп Н.И., Просяников Е.В., Коровакская С.О. Радиоэкологическая роль калийных удобрений в агросистемах, загрязненных цезием-137 // Совершенствование методологии агрохимических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 152–165.
- Раменский Л.Г. Основные закономерности растительного покрова и их изучение. Воронеж, 1925. 27 с.
- Раменский Л.Г. О принципиальных установках, основных понятиях и терминах производственной типологии земель, геоботаники и экологии // Сов. ботаника. 1936. № 4. С. 25–42.
- Ратников А.Н., Алексахин Р.М., Жигарева Т.Л. и др. Загрязнение сельскохозяйственных угодий радионуклидами в результате ядерных аварий // Влияние почвенно-климатических условий на их переход в системе почва–растение. Сб. Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах. М., 1994. С. 131–146.
- Ратников А.Н., Попова Г.И., Алексахин Р.М., Жигарева Т.Л. Комплекс агрометеорологических мероприятий на сельскохозяйственных угодьях, подвергшихся радиоактивному загрязнению // Там же. С. 121–130.
- Ремезов Н.П., Быкова Л.Н., Смирнова К.М. Потребление и круговорот азота и зольных элементов в лесах европейской части СССР. М., 1959.
- Роден А.А. Теоретические и практические результаты исследований по преобразованию естественных полупустынных биогеоценозов в агролесные биогеоценозы // Биогеоэкологические основы освоения полупустыни Северного Прикаспия. М.: Наука, 1974. С. 337.
- Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности. М.; Л., 1965.
- Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л., 1968.
- Рожков А.Г. О среднемноголетней величине смыва почв с пашни в ЦЧЗ // Защита почв от эрозии: Науч.-техн. бюл. Курск, 1977. Вып. 4 (15). С. 13–18.
- Рожков А.Г., Медведев Н.В., Захарченко Л.Я. Расчет величины твердого стока на склоновых землях // Там же. 1973. Вып. 1. С. 6–11.
- Розанов А.Б., Розанов Б.Г. Экологические последствия антропогенных изменений почв. М.: ВИНТИ, 1990. 1–151 с. (Итоги науки и техники. Почвоведение и агрохимия; Т. 7).
- Розанов А.Ю. История становления скелетных фаун // Сорос. образов. журн. 1996. № 12. С. 62–68.
- Розанов Б.Г. Почвенный покров земного шара. М.: Изд-во МГУ, 1977. 248 с.
- Розанов Б.Г. Морфология почв. М.: Изд-во МГУ, 1983. 320 с.
- Розанов Б.Г., Таргульян В.О., Орлов Д.С. Глобальные тенденции изменения почв и почвенного покрова // Почвоведение. 1989. № 5. С. 5–18.
- Розов Н.Н. Развитие учения В.В. Докучаева о зональности почв в современный период // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1954. № 4.
- Розов Н.Н., Мельников Л.А., Строганова М.Н. и др. Оценка мировых земельных ресурсов и возможностей расширения земледелия в связи с разработкой моделей и стратегией глобального развития // Природные ресурсы и окружающая среда / Международный центр науч. и техн. инфор. АН СССР. М., 1978.
- Розов Н.Н., Строганова М.Н. Почвенный покров мира. М.: Изд-во МГУ, 1979. 290 с.
- Розов Н.Н., Фридланд В.М. Почвенно-географические области Мира // Ежегодник БСЭ, 1964. М., 1964.
- Романова Т.А., Пучкарева Т.Н., Никитина А.Н., Котович А.М. Интенсификация земледелия в условиях неоднородности почвенного покрова. Минск: БелНИИНТИ, 1988. 44 с.
- Романова Э.П., Куракова Л.И., Ермаков Ю.Г. Природные ресурсы мира. Изд-во МГУ, 1993. 57 с.
- Сабольч И. Осолодение (деградация) орошаемых почв Венгерской низменности // Почвоведение. 1955. № 11. С. 36–40.
- Самойлова Е.М. Предельно-допустимые параметры степных черноземов Алтай-



- ского края при орошении // Вестн. с.-х. науки. 1989. № 4.
- Самойлова Е.М., Сизов А.П., Яковченко В.П.* Органическое вещество почв черноземной зоны. Киев: Наук. думка, 1990. 117 с.
- Сапожников А.П.* Влияние лесных пожаров на формирование почвенных комбинаций в горных условиях // Структура почвенного покрова и ее значение для картирования почв, учета и использования почвенных ресурсов. Кишинев, 1980. С. 61–63.
- Сапожников П.М.* Физические параметры почв при уплотненном действии сельскохозяйственной техники // Вестн. с.-х. науки. 1990. № 6.
- Селиванов И.А.* Теоретические и практические проблемы изучения консорциев: Общие проблемы биоценологии. М.: Наука, 1990. 210 с.
- Сердобольский И.П.* Варьирование химических свойств компонентов солонцового комплекса почв // Тр. комис. по ирригации АН СССР. М.; Л., 1937. Вып. 9.
- Серова Е.Н.* Динамика К, NH<sub>4</sub>, Mn в дерново-подзолистой почве под ельником волосистоосоковым // Почвообразование в лесных БГЦ. М.: Наука, 1989.
- Смулов А.В.* Статистические методы в исследовании пространственного размещения организмов // Методы почвенно-зоологических исследований. М.: Наука, 1975. С. 217–240.
- Снакин В.В.* Биогенный круговорот химических элементов и подходы к его изучению // Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. М., 1987.
- Соколов Б.А., Федонкин М.А.* Ранние этапы развития жизни на Земле // Современная палеонтология. М.: Недра, 1988. Т. 2. С. 118–142.
- Соколов Б.С., Барсков И.С.* Палеонтология и эволюция биосферы // Там же. 1988. Т. 2. С. 245–254.
- Сорокина Л.Е., Зенова Г.М., Звягинцев Д.Г.* Влияние длительного применения минеральных удобрений, извести и навоза на структуру комплекса актиномицетов дерново-подзолистой почвы // Вестн. МГУ. Сер. 17, Почвоведение. 1991. № 1.
- Спирidonov А.И.* Геоморфологическое районирование Восточно-Европейской равнины // Землеведение. 1969. Т. 8 (48). С. 76–111.
- Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 2. 209 с.
- Страхов Н.М.* Развитие литогенетических идей в России и СССР. М., 1971. 608 с.
- Стриганова Б.Р.* Адаптивные стратегии освоения животными почвенного яруса // Почвоведение. 1996. № 6. С. 714–721.
- Суетова И.А.* География живого вещества // Природа. 1976. № 2. С. 34–37.
- Сурмач Г.П.* Опыт расчета смыва почв для построения комплекса противоэрозионных мероприятий // Почвоведение. 1979. № 4. С. 92–104.
- Сурмач Г.П.* Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1992. 174 с.
- Сушкина Н.Н., Цюруна И.Г.* Микрофлора и первичное почвообразование. М.: Изд-во МГУ, 1973. 157 с.
- Таргульян В.О., Александровский Л.Г.* Эволюция почв в голоцене // История биогеоценозов СССР в голоцене. М.: Наука, 1976.
- Таргульян В.О., Роде А.А., Дмитриев Е.А., Арманд А.Д.* Почва как компонент природных экосистем: Изучение ее истории, современной динамики и антропогенных изменений // Материалы Сов.-Амер. симпозиума по биосфер. заповедникам. М., 1976. Ч. 1.
- Терешина Т.В.* Марганцевисто-железистые новообразования в суглинистых подзолистых и пойменных почвах центральных районов Русской равнины: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1972. 24 с.
- Тимофеев-Ресовский Н.В., Яблоков А.В., Готов Н.В.* Очерк учения о популяции. М.: Наука, 1973. 301 с.
- Тирранен Л.С.* Роль летучих метаболитов в межмикробном взаимодействии. Новосибирск: Наука, 1989. 104 с.
- Тиссен С.* Геохимические и фитобиологические связи в свете прикладной геофизики // Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., 1954.
- Титлянова А.А.* Системное описание круговорота веществ. Основные понятия и количественные параметры // Экология. 1984. № 1.
- Тихоненко Д.Г.* Влияние антропогенного фактора на СПП арен Полесья УССР // Структура почвенного покрова и ее значение для картирования почв, учета и использования почвенных ресурсов. Кишинев, 1980. С. 63–65.
- Трегубов П.С., Зверхановский Н.В.* Борьба с эрозией почв в Нечерноземье. Л.: Колос, 1981. 160 с.
- Уиттекер Р.* Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 77 с.
- Умаров М.М.* Ассоциативная азотфиксация. М.: Изд-во МГУ, 1989. 131 с.

- Умаров М.М., Степанов А.Л., Меняйло О.В.* Превращение закиси азота микроорганизмами в солончаках // Почвоведение. 1997. № 2. С. 21–23.
- Урсу А.Ф.* Техногенно-преобразованные структуры почвенного покрова // Структура почвенного покрова и ее значение для картирования почв, учета и использования почвенных ресурсов. Кишинев, 1980. С. 66–69.
- Уткин А.И.* Изучение лесных биогеоценозов // Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1974. С. 281–317.
- Уткин А.И., Дылис Н.В.* Изучение вертикального распределения фитомассы в лесных биогеоценозах // Бюл. МОИП. Сер. биол. 1966. Т. 71, вып. 6.
- Ферсман А.Е.* Геохимия. Л.: ОНТИ, 1937. Т. 1. 260 с.
- Ферсман А.Е.* Избранные труды. Т. 4. М., 1958.
- Фридланд В.М.* Опыт почвенно-географического разделения горных систем СССР // Почвоведение. 1951. № 9.
- Фридланд В.М.* К вопросу о факторах зональности // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1959. № 5.
- Фридланд В.М.* Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 423 с.
- Фридланд В.М.* Структуры почвенного покрова мира. М.: Мысль, 1984. 235 с.
- Хегнер П., Томкова Д., Маречек Й.* Содержание токсикантов в минеральных удобрениях в Чехословакии // Агрохимия. 1991. № 7.
- Хильми Г.Ф.* Биогенные превращения энергии и их экологическое значение // Проблемы оптимизации в экологии. М., 1978.
- Химельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами. М.: Мир, 1973. 957 с.
- Хлебникова Г.М., Гиличинский Д.А., Федоров-Давыдов Д.Г., Воробьева Е.А.* Количественная оценка микроорганизмов в многолетнемерзлых отложениях и погребенных почвах // Микробиология. 1990. Т. 59, № 1. С. 148–155.
- Хлебникова Е.Н.* Процессы осолодения почвогрунтов степной зоны при орошении // Предупреждение и ликвидация заболачивания и засоления орошаемых земель. М., 1989. С. 116–119.
- Холопова Л.Б.* Динамика свойств почв в лесах Подмосковья. М., 1982. 118 с.
- Холопова Л.Б., Солнцева О.Н.* Связь продуктивности травянистого яруса с некоторыми эдафическими параметрами // Общие проблемы биогеоценологии. М., 1986. Т. 1. С. 211–212.
- Храмов А.А.* О терминах и понятиях системы продуктивности // Раст. ресурсы. 1970. Т. 6, № 1.
- Хэппер К.М.* Внеклеточные полисахариды почвенных бактерий // Почвенная микробиология. М.: Колос, 1979. С. 120–135.
- Чернова Н.М.* Экология // Определитель коллембол СССР. М.: Наука, 1988. С. 38–51.
- Черняховский А.Г.* Современные коры выветривания. М.: Наука, 1991. 207 с.
- Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 366 с.
- Шевченко П.Р.* Современные склоновые процессы на территории Брянской области и необходимость их учета при мелиорации земель // Экологические и географические основы мелиорации земель в бассейне р. Десны. М., 1980. С. 101–109.
- Шеин Е.В., Махновецкая С.В.* Агрофизическая количественная оценка водного режима южных орошаемых черноземов // Вестн. МГУ. Сер.17, Почвоведение. 1994. № 1. С. 3–12.
- Шеин Е.В., Махновецкая С.В.* Агрофизическая оценка почв на основе анализа прогнозного водно-воздушного режима // Почвоведение. 1995. № 2. С. 187–191.
- Шеин Е.В., Умарова А.Б., Ван Ицюань, Початкова Т.Н.* Водный режим и изменение элементного состава дерново-подзолистых почв в условиях больших лизиметров // Вестн. МГУ. Сер.17, Почвоведение. 1997. № 2. С. 31–37.
- Шенборн В.* Изучение эволюции на примере раковинных амёб (Testacea) // Журн. общ. биологии. 1971. Т. 32, № 5. С. 530–540.
- Шепард Ф.П.* Морская геология. Л.: Недра, 1976.
- Шубин В.И.* Микосимбиотрофия и устойчивость лесных биогеоценозов таежной зоны // Общие проблемы биогеоценологии: Тез. докл. II Всесоюз. совещ. М., 1986. Т. 1.
- Якименко Е.Ю.* Сравнительная характеристика почвообразования в луговых и лесных БГЦ // Почвообразование в лесных БГЦ. М.: Наука, 1989. С. 79–102.
- America: Journal.* 1997. Vol. 61. P. 4–11.
- Kubiens L.W.* Micropedology. Ames (Iowa), 1938.
- Lynch J.M.* Soil biotechnology. Oxford, 1983.
- Martin J.M., Meybeck M.* Elemental mass-balance of material carried by major world rivers // Mar. Chem. 1979. Vol. 7, N 2. P. 173–206.
- Milliman J.D., Summerhayer C.P., Baretto H.T.* Oceanography and suspended matter of the

- Amazon River, Febr.-March 1973 // J. Sediment. Petrol. 1975. Vol. 45, N 1. P. 189-206.
- Moor- und Torfkunde. Stuttgart, 1980. 338 s.
- Polianskaya L.M., Zvyagintsev D.G.* Microbial succession in soil // Ecological microbiology. L.: Harwood, 1995. P. 67.
- Pritchard D.W.* Estuarine hydrography // Adv. Geophys. 1952. Vol. 1. P. 243-280.
- Pritchard D.W.* Observations of circulation in coastal plain estuaries // Estuaries. N.Y., 1967. P. 37-44. (Amer. Assoc. Adv. Sci. Publ.; Vol. 83).
- Reuter J.P., Perdue E.M.* Importance of heavy metal-organic matter interactions in natural waters // Geochim. et cosmochim. acta. 1977. Vol. 41, N 3. P. 325-334.
- Schmidt E.L.* An ecology of the legume root nodule bacteria // Interactions between non-pathogenic soil microorganisms and plants / Ed. Y.R. Dommergues, S.V. Krupa. Amsterdam, 1978.
- Schönborn W.* Adaptive polymorphism in soil-inhabiting testate Amoebae (Rhizopoda): Its importance for delimitation and evolution of asexual species // Arch. Protistenk. 1992. Bd. 142. S. 139-155.
- Schönborn W.* Studien über die Gattung Diffugiella Cash (Rhizopoda, Testacea) // Limnologica (Berlin). 1965. N 3. S. 315-328.
- Sheppard J.C., Westberg H., Zimmerman P.* Inventory of global methane sources and their productivity rates // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87, N 2. P. 305-312.
- Sombroec W.G.* Soils and biodiversity // Trans. of XV World Congr. of soil sci., Acapulco. Mexico, 1994. Vol. 4a. P. 184-185.
- Sposito G.* Chemical equilibria and kinetics in soils. N.Y.; Oxford: Oxford Univ. press, 1994. 268 p.
- Tietje O., Hennings V.* Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to variability within
- FAO textural classes // Geoderma. 1996. Vol. 69. P. 71-84.
- Trefrey J.H., Presley B.J.* Heavy metal transport from the Mississippi River to the Gulf of Mexico // Marine pollution transfer. L.: Lexington Books, 1976. P. 39-76.
- Vachaud G., Passerat de Silans A., Balabanis P., Vauclin M.* Temporal stability of spatially measured soil water probability density function // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1985. Vol. 49. P. 822-828.
- World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note / Global assessment of soil degradation (GLASOD). Paris 1990-91.
- Zaidelman F.R.* A concept of gleyization and its role in the pedogenesis // Arch. Acker-Pflanz., Bodenkunde. 1994. Vol. 38. P. 323-325.
- Zaidelman F.R.* Peculiar features of recent processes in soils under reclamation and problems of soil optimization, degradation and conservation // Problems of anthropogenic soil formation: Moscow Intern. conf., June 16-21, 1997. Moscow, 1997. P. 274-276.
- Zaidelman F.R., Shvarov A.P.* Changes in hydrothermic regime and rates of biochemical decomposition in drained peat soils under the influence of sand addition // Ibid. 1997. P. 277-279.
- Zvyagintsev D.G.* Dynamics of microbial populations in soils in the light of the general concept of soil microorganisms complex functioning // Soil biology and conservation of the biosphere. Budapest, 1984.
- Zvyagintsev D.G., Kozhevnikov P.A., Kirillova N.P.* Ecological characteristics of rhizosphere // Problems of soil science: Trans. of XV World Congr. of soil sci., Acapulco. Mexico, 1994. Vol. 4b. P. 187-189.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>О месте почвы и почвенной биоты в биосфере (Г.В. Добровольский, Л.О. Карпачевский, Е.Д. Никитин) .....</b>	<b>5</b>
<b>ЧАСТЬ I</b>	
<b>МЕСТО ПОЧВЫ В СТРУКТУРЕ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ И БИОСФЕРЫ .....</b>	<b>13</b>
<i>Глава 1</i>	
<b>Понятие о почве как особом естественно-историческом теле (А.С. Владыченский) .....</b>	<b>14</b>
<i>Глава 2</i>	
<b>Морфология и морфогенез почв (С.А. Шоба) .....</b>	<b>26</b>
<i>Глава 3</i>	
<b>Разнообразие почв на земле как следствие географического разнообразия факторов и условий почвообразования (Г.С. Куст, С.Я. Трофимов) .....</b>	<b>37</b>
<i>Глава 4</i>	
<b>Почвенный покров и его структура как компонента наземных экосистем (М.Н. Строганова) .....</b>	<b>45</b>
<i>Глава 5</i>	
<b>Эколого-географические закономерности структуры педосферы (И.С. Урусевская) ....</b>	<b>54</b>
<b>ЧАСТЬ II</b>	
<b>ФУНКЦИИ ПОЧВ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ .....</b>	<b>71</b>
<i>Глава 1</i>	
<b>Почва как биокосная полифункциональная система. Разнообразие и взаимосвязь почвенных экотипов (Е.Д. Никитин) .....</b>	<b>72</b>
<i>Глава 2</i>	
<b>Физические основы функций почв (Е.Д. Шейн) .....</b>	<b>80</b>
<i>Глава 3</i>	
<b>Экологические функции почв, обусловленные спецификой их химического состава, свойств и процессов как биокосных тел (Д.С. Орлов) .....</b>	<b>90</b>

<i>Глава 4</i>	
<b>Строение и функционирование комплекса почвенных микроорганизмов (Д.Г. Звягинцев) .....</b>	102
<i>Глава 5</i>	
<b>Роль микроорганизмов в биоценологических функциях почв (Д.Г. Звягинцев, Т.Г. Добровольская, И.П. Бабьева, Г.М. Зенова, Л.В. Лысак, О.Е. Марфенина) .....</b>	115
<i>Глава 6</i>	
<b>Роль микроорганизмов в круговороте химических элементов в наземных экосистемах (М.М. Умаров) .....</b>	125
<i>Глава 7</i>	
<b>Микроструктурный уровень организации почв и почвенная нанофауна (А.А. Бобров) .....</b>	139
<i>Глава 8</i>	
<b>Структура и функции сообществ почвообитающих животных (Б.Р. Стриганова) .....</b>	151
<i>Глава 9</i>	
<b>Функции почв как основного звена в цикле биологического круговорота веществ и устойчивость наземных экосистем (В.Д. Васильевская, Л.Г. Богатырев) .....</b>	174
<i>Глава 10</i>	
<b>Влияние растений на почву (Л.О. Карпачевский) .....</b>	188
<i>Глава 11</i>	
<b>Экологические функции лесных почв (Л.О. Карпачевский, Т.А. Зубкова, Л.С. Ильина) ...</b>	206
<i>Глава 12</i>	
<b>К организации свойств почвенного покрова под елями (Е.А. Дмитриев, И.В. Рекубратский, Ю.В. Горелова, В.Г. Витязев) .....</b>	214
 <b>ЧАСТЬ III</b> 	
<b>ГЛОБАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА .....</b>	228
<i>Глава 1</i>	
<b>Влияние почв и почвенных процессов на литосферу (В.О. Таргульян) .....</b>	229
<i>Глава 2</i>	
<b>Влияние свойств почв и почвенных процессов на гидросферу (Д.С. Орлов, В.В. Демин) ....</b>	239
<i>Глава 3</i>	
<b>Роль почвы в формировании состава атмосферы (Д.С. Орлов, В.В. Демин) .....</b>	252
<i>Глава 4</i>	
<b>Значение почв в эволюции жизни и сохранении на Земле биологического разнообразия (Г.В. Добровольский) .....</b>	262
 <b>ЧАСТЬ IV</b> 	
<b>РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ПОЧВ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА .....</b>	271
<i>Глава 1</i>	
<b>Плодородие почвы как важнейший экологический фактор в жизни человека (В.Г. Минеев) .....</b>	272
<i>Глава 2</i>	
<b>Глобальный характер угрозы современной деградации почвенного покрова (Г.В. Добровольский) .....</b>	279

<i>Глава 3</i>	
<b>Проблемы эрозии и охраны почв (М.С. Кузнецов, Н.Г. Добровольская, А.Д. Флесс, Л.Ф. Литвин) .....</b>	289
<i>Глава 4</i>	
<b>Экологические функции агрохимических средств в агробиозэкосистемах (В.Г. Минеев) .....</b>	301
<i>Глава 5</i>	
<b>Мелиорация почв как элемент рационального землепользования и их защиты от деградации (Ф.Р. Зайдельман) .....</b>	312
<i>Глава 6</i>	
<b>Методы и приемы регулирования плодородия почвы и оптимизации удобрения культурных растений (В.Г. Минеев) .....</b>	323
<i>Глава 7</i>	
<b>Особая охрана и Красная книга почв, кадастр ценных почвенных объектов (Е.Д. Никитин) .....</b>	335
<b>Заключение. Экологические функции, генезис и использование почв .....</b>	347
<b>Литература .....</b>	349

Научное издание

**СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РОЛЬ ПОЧВ  
И ПОЧВЕННОЙ БИОТЫ В БИОСФЕРЕ**

*Утверждено к печати*

*Ученым советом Института почвоведения  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова  
и Российской академии наук*

Зав. редакцией *Н.А. Степанова*

Редактор *Н.М. Александрова*

Художник *Ю.И. Духовская*

Художественный редактор *В.Ю. Яковлев*

Технический редактор *А.Л. Шелудченко*

Корректоры *А.Б. Васильев, Е.Л. Сысоева, Т.И. Шеповалова*

Подписано к печати 12.11.2003  
Формат 70 × 100 1/16. Гарнитура Таймс  
Печать офсетная  
Усл. печ.л. 29,9. Усл.кр.-отт. 30,6. Уч.-изд.л. 31,1  
Тираж 370 экз. Тип. зак. 4725

Издательство “Наука”  
117997 Москва, Профсоюзная ул., 90

E-mail: [secret@naukaran.ru](mailto:secret@naukaran.ru)  
Internet: [www.naukaran.ru](http://www.naukaran.ru)

Санкт-Петербургская типография “Наука”  
199034 Санкт-Петербург, 9-я линия, 12