

Сибирское отделение РАН
Государственная публичная научно-техническая библиотека
Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти
Восточной нефтяной компании

Серия «Экология»
Издается с 1989 г.
Выпуск 84

**ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ
НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Выпуск 3

Современные методы изучения болотных систем.
Регламентирование деятельности недропользователей
в условиях Западной Сибири

Аналитический обзор

Новосибирск, 2007

ББК 33.36+28.081

Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений. Вып. 3. Современные методы изучения болотных систем. Регламентирование деятельности недропользователей в условиях Западной Сибири = Environmental Escort for exploitation oil and gas deposits. Issue 3. Modern methods for studying marsh systems. Activity regulations for entrails users under the conditions of Western Siberia : аналит. обзор / А. Г. Гендрин, Г. Г. Румянцева, В. П. Колмогоров, Ю. П. Мыльников, Е. С. Русинова, М. П. Щеголихина, С. В. Квашнина, У. В. Курганская ; Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, ТомскНИПИнефть ВНК. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2007. – 111 с., ил. + вкл. табл. – (Сер. Экология. Вып. 84).

ISBN 5-94560-101-2

Третий выпуск серии «Экологическое сопровождение нефтегазовых месторождений» посвящен экологическим проблемам, связанным с воздействием нефтегазовой промышленности на водные ресурсы.

Представлен опыт использования аэрокосмической информации и методов дешифрирования снимков. Рассмотрены вопросы оценки экологической ситуации водных объектов при пересечении трубопроводов и инженерно-геологический мониторинг участков подводных переходов.

Обзор предназначен для специалистов в области охраны окружающей среды и природопользования, а также для преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

The 3rd issue of the series «Environmental Escort for exploitation oil and gas deposits» is devoted to environmental problems, connected with the impact of oil and gas industry on water resources. The experience of using space information and shorts decoding is presented. The questions of environmental situation assesment of water objects under pipelines crossing and engineering and geological monitoring of under water crosses are considered. The review is for specialists in environmental protection and land using, as well as for tutors, post-graduates and students.

Ответственный редактор д-р физ.-мат. наук В.В. Белов

Обзор подготовлен к печати д-ром пед. наук О.Л. Лаврик
канд. пед. наук Т.А. Калужной
канд. пед. наук Л.Б. Шевченко
М.Б. Зеленской

ISBN 5-94560-101-2 © Государственная публичная научно-техническая библиотека
Сибирского отделения Российской академии наук
(ГПНТБ СО РАН), 2007

ВВЕДЕНИЕ

Развитие нефтегазовой промышленности является одним из наиболее весомых факторов воздействия на окружающую среду в целом, и водные ресурсы в частности. Учитывая специфику размещения нефтегазового комплекса в Томской области (высокая заболоченность территории, наличие верховых болот, густая речная сеть), возможное воздействие на водные ресурсы оценивается как значительное. В связи с этим вопросы охраны поверхностных вод имеют большую актуальность.

Долгое время исследователи в области гидрологии уделяли много внимания водотокам и водоемам, не заостряя свое внимание на болотах. Практика разработки и обустройства месторождений нефти и газа показала, что болотные системы по своим природно-техническим свойствам являются крайне сложными для освоения (дорожное строительство, прокладка коммуникаций, строительство объектов) и требуют углубленного изучения. В современных условиях наиболее совершенный и объективный способ исследования болотных массивов – использование аэрокосмической информации и методов дешифрирования снимков.

Дешифрирование аэрофото- и космических снимков позволяет надежно выделить территорию и определить тип болотного массива, установить границы и закономерности распределения болотных микроландшафтов, характер и размеры элементов внутриболотной гидрографической сети, определить направления движения болотных вод.

Наибольшее воздействие на поверхностные водные объекты возможно при пересечении водных объектов и их водоохраных зон инженерными коммуникациями и при возникновении разного рода аварийных ситуаций. Загрязнение водных ресурсов при аварийном разливе – проблема мирового масштаба. Поэтому в данном аналитическом сборнике рассмотрены вопросы оценки экологической ситуации водных объектов при пересечении трубопроводов и инженерно-геологический мониторинг участков подводных переходов.

Глава 1. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОЛАНДШАФТОВ ЗОНЫ ВЫПУКЛЫХ ОЛИГОТРОФНЫХ (СФАГНОВЫХ) БОЛОТ

1.1. Природный объект «болото» – термины и определения. Развитие болота. Классификация болот

К настоящему моменту в научной и специальной литературе опубликовано достаточное количество работ, так или иначе связанных с проблемой классификации и определения болота как природного объекта.

Учитывая общую характеристику процесса заболачивания водной и минеральной поверхности суши, К.Е. Иванов предлагает наиболее ёмкое определение: «Болотом или болотным ландшафтом называется участок территории, характеризующийся обильным застойным или слабопроточным увлажнением верхних горизонтов почвогрунтов, на котором произрастает специфическая болотная растительность. Идет процесс торфообразования и торфонакопления, и толщина торфа такова, что живые корни основной массы растений не достигают подстилающего минерального грунта» /1/. В нормативном документе содержится следующее определение: «болото – природное образование, занимающее часть земной поверхности и представляющее собой отложения торфа, насыщенные водой и покрытые специфической растительностью»/2, 3/.

Развитие болота

Развитие болота как естественного сложного природного образования можно представить в виде определенно чередующихся закономерностей: процесс торфообразования и торфонакопления; повышение отметок всей его поверхности над первоначальной; распространение болота в ширину; последовательная смена растительных ассоциаций на поверхности болота и сформированных ими торфов; изменение гидрологических условий, водно-минерального и воздушного режимов почвогрунтов и болота в целом; изменение рельефа болот и образование особой гидрографической сети.

Перечисленные закономерности развития болот осуществляются в двух направлениях: центрально-олиготрофное и периферически-олиготрофное.

В первом случае смена растительности, ухудшение кислородного, минерального, водного режимов происходит в центре, а затем распространяется на периферийные участки, наиболее удаленные от границ болотного массива.

ва. Такой ход развития свойственен болотам, формирующимся в замкнутых бессточных или полузамкнутых сточных котловинах или пологих депрессиях земной поверхности. Этот процесс развития массивов в первичных очагах заболачивания наиболее распространен /4, 5/. При этом под понятием «болотный массив» /6/ понимается часть земной поверхности, занятая болотом, границы которого в плане образуют замкнутый контур. При этом границы болота определяются по нулевой глубине торфяной залежи.

Периферически-олиготрофный процесс происходит в вытянутых понижениях или долинах, по тальвегу которых протекают реки или ручьи.

Становление болота и в том и другом случае происходит в три фазы: первая характеризуется наличием евтрофной растительности и одноименного торфа, вогнутой формой рельефа; вторая – мезотрофным торфом и выравниванием поверхности болота до горизонтальной; третья – олиготрофным торфом и выпуклой формой рельефа. Выделение в пределах каждой фазы различных стадий развития болотного массива рассмотрено в ряде основополагающих работ по болотоведению Ю.Д. Цинзерлинга /7/, Е.А. Галкиной /4, 8, 9/, И.Д. Богдановской-Гиенэф /10/.

Классификация болот

Классификация болот в гидрологии основывается на учете главных факторов формирования их водного режима:

- 1) геоморфологических условий залегания болотных массивов и связанных с ними типов водного питания;
- 2) рельефа поверхности болот, определяющего механизм стекания воды и степень прочности торфяной залежи;
- 3) растительного покрова и закономерностей в распределении его по территории болот /1/.

В связи с этим болота можно разделить на две основные группы: болота водораздельных речных пространств и болота речных долин. В группу болот водораздельных речных пространств входят:

а) болота плакорно-водораздельного залегания, расположенные на обширных плоских водоразделах речных водосборов. Стеkanie воды происходит в разные речные системы (рис. 1.1);

б) болота водораздельно-склоновые плакорного залегания, размещающиеся на пологих склонах междуречных пространств. Они характерны для водоразделов между двумя притоками главной реки. Механизм стекания воды зависит от рельефа и положения болота. Сток воды осуществляется в направлении общего склона в один водоприемник либо в направлении к главной реке;

в) болота котловинного залегания, расположенные либо в замкнутых бессточных или проточных депрессиях, из которых сток воды осуществляется по одному или нескольким ручьям, водоприемникам при отсутствии впадающих ручьев, либо в котловинах, впадинах, с впадающими в них ручьями, но не имеющих руслового стока. Для таких болот характерно стекание воды со склонов котловины, окружающих их (рис. 1.2).

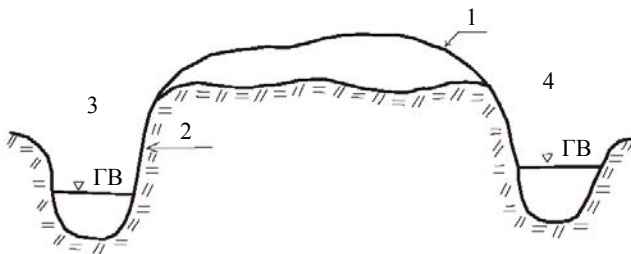


Рис. 1.1. Болото плакорно-водораздельного залегания:

1 – поверхность болота, 2 – поверхность подстилающего грунта, 3, 4 – реки;
ГВ – горизонт воды.

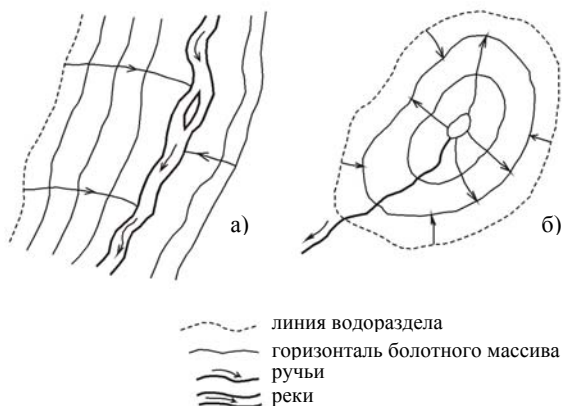


Рис. 1.2. Схема стекания воды на болотах котловинного залегания:

поверхность болота с вогнутой (а) и выпуклой (б) поверхностями.

Болота речных долин состоят:

а) из пойменных болотных массивов, расположенных в поймах рек с горизонтальной или со слабонаклонной поверхностью в сторону русла реки. Стеkanie воды осуществляется по всему фронту дренирования их рекой;

б) притеррасных болот, которые занимают площади речных террас и в силу своего более высокого положения не заливаются речными водами в период половодья и паводков. На широких и плоских террасах такие массивы имеют горизонтальное залегание. Если они залегают на пологих сглаженных склонах террас или впадинах у подножий крупных склонов выше-расположенных террас, то характеризуются общим наклоном к руслу реки.

1.2. Болотные ландшафты зоны выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот

На территории Западно-Сибирской равнины выделяется шесть болотных зон: полигональных, плоскобугристых, крупнобугристых, выпуклых олиготрофных (сфагновых), плоских евтрофных и мезотрофных (осоково-гипновых и лесных), вогнутых евтрофных (тростниковых) и засоленных (травяных) болот /11/. Указанные шесть зон были определены на основе анализа результатов экспедиционных исследований /11/, а также изучения материалов аэрофотосъемки болот, картографических данных и сведений, содержащихся в работах М.С. Боч /12, 13/, Н.И. Пьявченко /14, 15/, Е.А. Галкиной /16/, Л.В. Шумиловой /17/.

Для каждой из болотных зон отмечается преобладающий тип болот. Характер и структура растительного покрова болотных массивов обусловлены морфологией последних, климатом, а также водным балансом болотных систем и их отдельных частей.

Нами рассмотрена зона выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот, которая занимает центральную часть Западно-Сибирской равнины. В пределах зоны преимущественно развивается производственная деятельность ОАО «Томскнефть» ВНК. Площадь зоны составляет 46% всей территории равнины.

Рельеф поверхности в пределах зоны относительно ровный, с отметками от 80 до 100 м над уровнем моря, за исключением района Сибирских Увалов, где они достигают 190 м и более.

Годовое количество осадков в зоне выпуклых олиготрофных болот в среднем равно 590 мм, причем на теплый период года приходится 60–70% их годовой суммы. Норма стока здесь составляет 200 мм, норма испарения 390 мм.

Климатические и геоморфологические условия этой зоны являются оптимальными для развития олиготрофных болот /11/.

Описание болот рассматриваемой зоны приведено в работах А.Я. Бронзова /18, 19/, С.Н. Тюремнова /20/, Е.А. Романовой /21–23/, Е.А. Романовой и Л.И. Усовой /24/, Ю.А. Львова /25–27/, Г.Г. Куликовой, О.Л. Лисс и соавт. /28/, О.Л. Лисс и соавт. /29/, Г.Г. Яснопольской /30/, Е.И. Лапшиной /31/, И.С. Ильиной и соавт. /32–34/, Е.Д. Лапшиной и соавт. /35, 36/, Л.И. Инишевой и соавт. /37/, К.Е. Иванова, С.М. Новикова /11/.

Основные типы болотных микроландшафтов

Болото в целом и отдельные его части рассматриваются как элементы географического ландшафта. Основные таксономические единицы и типы болотных ландшафтов, установленные Е.А. Галкиной /4/, впоследствии получили достаточно подробную качественную и количественную геоботаническую и гидроморфологическую характеристику в работах Е.А. Романовой /38/ и К.Е. Иванова /39/.

Классификация болот во многом основывается на понятии «болотный микроландшафт». Болотный микроландшафт или болотная фация является наименьшей таксономической единицей болотного ландшафта и представляет собой участок болота, однородный по растительному покрову, микрорельефу поверхности, физическим свойствам верхнего горизонта торфяной залежи и водному режиму.

Любое болото, независимо от его размеров и происхождения, может быть представлено либо одним микроландшафтом, либо несколькими различными типами микроландшафтов. Закономерности размещения на территории болота разных типов болотных микроландшафтов, характеризуя в свою очередь разные типы болотных образований более высоких таксономических рангов, являются в то же время и их индикаторными признаками, позволяющими судить об их физических свойствах, строении и гидрологических характеристиках.

Несколько болотных микроландшафтов образуют простой болотный мезоландшафт или болотное урочище.

Сочетание изолированных мезоландшафтов в процессе развития и слияния простых болотных урочищ формирует болотный макроландшафт. Таким образом, болотный макроландшафт представляет собой сложный болотный массив (по И.Д. Богдановской-Гиенэф, /10/), состоящий из нескольких слившихся простых болотных массивов. Поэтому болотный макроландшафт называют также системой болотных массивов /5, 38/.

Направленность и быстрота изменений болотных мезо- и макроландшафтов определяются комплексом климатических, геоморфологических и гидрологических условий и законами развития растительности. Кроме того, процесс развития простых или сложных массивов может осуществляться повсеместно либо одним и тем же путем (центрально-олиготрофным, периферически-олиготрофным или смешанным), либо отдельные части болот развиваются различными путями.

Для болот Западной Сибири характерным примером гигантского макроландшафта являются болота Обь-Иртышского водораздела, представляющие, по существу, единый болотный массив, охватывающий все бассейны и водоразделы рек, ограниченные с запада Иртышом, с севера и востока Обью, а с юга – северной границей Барабинской низменности. На рис. 1.3 (см. цв. вкладку) представлен фрагмент космического снимка (КС) Landsat-7 такого болотного макроландшафта. Аналогичные по размерам макроландшафты встречаются в Сургутском Полесье, бассейне реки Конды.

Основные типы болотных микроландшафтов достаточно детально рассмотрены в работах /1, 21, 22, 38, 40/. Дальнейшие исследования болотных микроландшафтов Западно-Сибирской равнины по материалам типологического дешифрирования болот на аэрофотоснимках с одновременными наземными обследованиями болот экспедициями Государственного гидрологического института (ГГИ) в 1958–1973 гг. позволили /11/ более де-

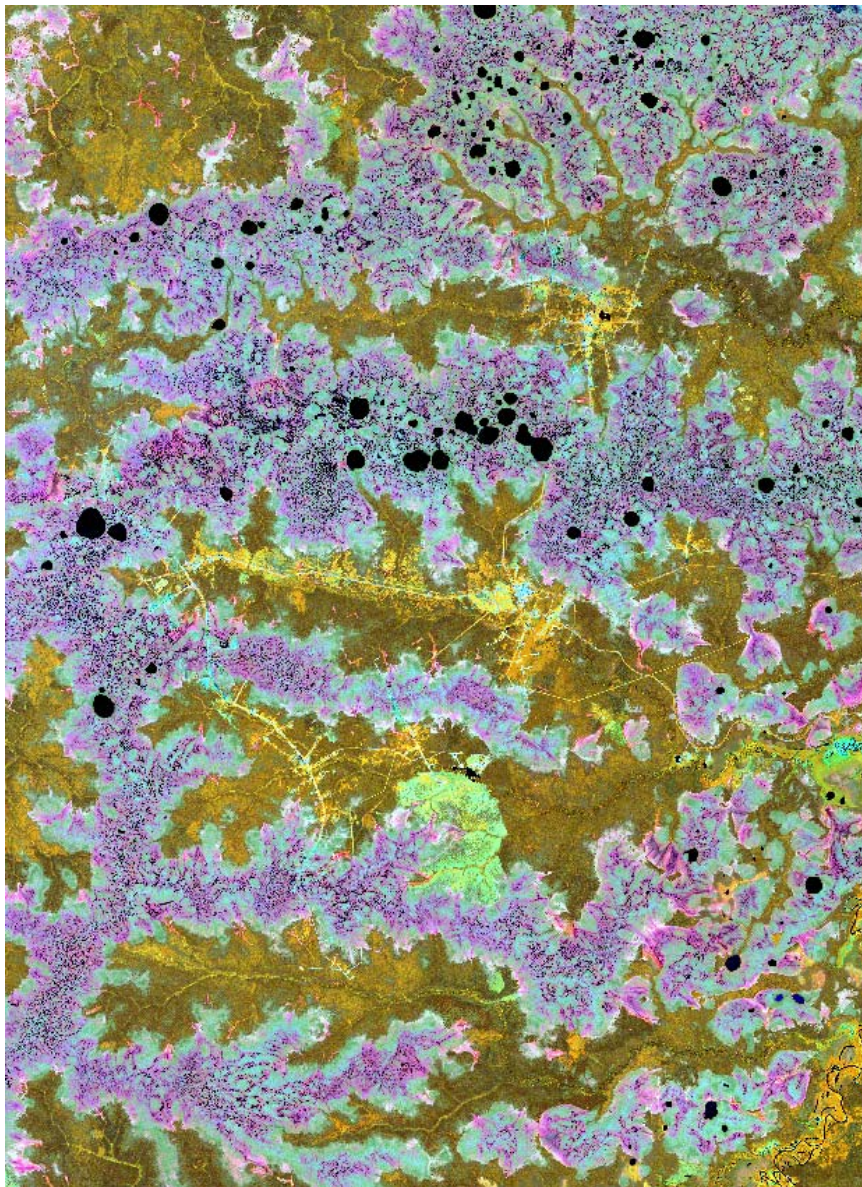


Рис. 1.3. Фрагмент космического снимка Landsat-7 гигантского макроландшафта болот Обь-Иртышского водораздела

тально рассмотреть структуру болотных микроландшафтов и выявить их основные особенности.

Встречающиеся на территории Западно-Сибирской равнины болотные микроландшафты были объединены в пять основных групп: 1 – лесные, 2 – мохово-лесные, 3 – моховые, 4 – мохово-травяные и травяные, 5 – комплексные. Для наиболее распространенных микроландшафтов в болотных зонах, расположенных южнее Сибирских Увалов, выполнена краткая характеристика, изложенная в работе К.Е. Иванова и С.М. Новикова /11/. В табл. 1.1 данной работы приведено краткое описание основных типов болотных микроландшафтов.

Районирование болотных ландшафтов зоны выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот

Общепринятым в гидрологии является гидроморфологический подход к районированию болотных ландшафтов зоны выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот Западно-Сибирской равнины. Районирование впервые было выполнено Е.А. Романовой /21, 22/ на примере выделения и описания отдельных болотных районов. В работе /11/ в соответствии с опытом многолетних гидрологических и геоботанических исследований болотных ландшафтов с применением аэрофотосъемки /1, 38, 39, 41 42/ и на основе упомянутого подхода выполнено районирование болотных ландшафтов. Исходными данными послужили материалы типологического дешифрирования болот по крупномасштабным аэрофотоснимкам (АФС) и данные экспедиционных и стационарных исследований ГГИ.

Сущность гидроморфологического принципа выделения районов заключается в том, что в качестве главных признаков районирования приняты структуры болотных ландшафтов различных рангов (микроландшафтов, массивов, систем) и их приуроченность к элементам рельефа территории. Это позволяет связать выделяемые внутризональные районы с преобладающими типами водного питания и водно-теплового режима болот. Районированием болот Западной Сибири с целью решения различных задач занимались: С.Н. Тюремнов /20/, П.Е. Логинов /43, 44/, М.Ф. Елизарьева /45/, Л.В. Шумилова /17, 46/, М.С. Кузьмина /47/, О.Л. Лисс /29, 48/, Ю.А. Львов /49/.

В работе /11/ выделено девять болотных районов, которым присвоены названия по расположению их в бассейнах соответствующих рек (и далее по главным гидроморфологическим особенностям болотных ландшафтов): 1 – Северососьвинский, 2 – Казымский, 3 – Обь-Кондинский, 4 – Кондр-Тавдинский, 5 – Лямин-Вахский, 6 – Обь-Иртышский, 7 – Тым-Кетский, 8 – Чулымский, 9 – Приенисейский (рис. 1.4, см. цв. вкладку).

Нами рассмотрен Обь-Иртышский сильнозаболоченный район, в пределах которого в основном развивается производственная деятельность ОАО «Томскнефть» ВНК.

Обь-Иртышский сильнозаболоченный район крупных сложных олиготрофных болотных систем с распространенными грядово-мочажинными,

Т а б л и ц а 1.1

Дешифровочные признаки и краткая наземная характеристика основных типов болотных микроландшафтов

Тип болотных микроландшафтов, наименование водных объектов	Дешифровочные признаки аэрофотоснимков	Ориентировка линий стекания относительно отображения на аэрофотоснимках	Дешифровочные признаки космических снимков Landsat-7 (4-5-3 каналы)	Генерализованная ориентировка линий стекания относительно отображения на космических снимках Landsat-7 (4-5-3 каналы)	Степень достоверности и достаточности признака для ориентировки линий стекания	Краткая наземная характеристика растительности	Геоморфологическое положение и источники водно-минерального питания
1	2	3	4	5	6	7	8
I. Водоемы							
Озера	Озера выглядят на снимке в виде черных пятен округлой или овальной формы (довольно крупных размеров) и резко выделяются по тону среди светлого фона болот. Встречаются чаще всего поодиночке (рис. 1.6,б – 1, см. цв. вкладку)	Для озер, занимающих наивысшие центральные участки болот, уровень воды стоит выше поверхности окраек болот, и линии стекания в этом случае расходятся от озера в стороны радиально. Для озер, расположенных преимущественно на склонах, при пониженном расположении по отношению к рельефу болота линии стекания направлены с нескольких сторон к озеру, а по направлению к краевой части болот – расходятся от озера в стороны к границе болота (рис. 1.6,б – А, см. цв. вкладку)	Озера выглядят на снимке в виде черных, иногда синих пятен округлой или овальной формы (довольно крупных размеров) и резко выделяются по тону среди общего фона болот. Встречаются чаще всего поодиночке (рис. 1.6,а – 1, см. цв. вкладку)	Для озер, занимающих наивысшие центральные участки болот, линии стекания расходятся от озера в стороны радиально. Для озер, расположенных на склоновых участках болот, линии стекания направлены с нескольких сторон к озеру, а по направлению к краевой части болот – расходятся от озера в стороны к границе болота (рис. 1.6,а – А, см. цв. вкладку)	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Определение направления потока требует привлечения других признаков	К берегам средних и крупных озер обычно примыкают сфагново-кустарничково-сосновые микроландшафты, реже сосново-сфагново-кустарничковые и грядово-мочажинные комплексы. Дно крупных озер, как правило, ровное со слабовыраженным понижением к центральной части, сложено преимущественно минеральными грунтами (пески, супеси, суглинки)	Озера имеют большое распространение на верховых болотах и значительно реже встречаются на болотах других типов. Крупные озера, как правило, являются остатками первичных водоемов ледникового происхождения. Глубины и площади их самые разнообразные. Озера иногда являются генетическим центром и занимают наивысшие точки болот, где сосредоточены наибольшие глубины торфа. Наоборот, при пониженном расположении по отношению к рельефу болота озера часто служат водоприемниками для поверхностных и грунтовых вод
Микроозерки	Микроозерки так же, как и озера, выглядят на снимке в виде черных, округлой или вытянутой формы пятен, но отличаются меньшими размерами и расположены чаще группами или вытянуты цепочкой (рис. 1.6,б – 2, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены перпендикулярно общему направлению полос (рис. 1.6,б – Б, рис. 1.8,б – А, см. цв. вкладку). На водораздельных участках линии стекания имеют противоположное направление или встречаются под прямым или острым углом	Микроозерки так же, как и озера, выглядят на снимке в виде черных пятен, отличаются меньшими размерами и расположены чаще группами или вытянуты цепочкой. Площадь открытой поверхности воды микроозерков, видимых на КС, обычно со-	На общем фоне болотного микроландшафта на склоновых участках наблюдаются расходящиеся к границе болота полосы преимущественно фиолетового и темно-фиолетового цветов, чередующиеся с черными пятнами разной формы и размеров озерков. Линии стекания направлены по осевой линии расходящихся к границе болота полос (рис. 1.6,а – Б, рис. 1.8,а – А, см. цв. вкладку).	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Определение направления потока требует привлечения других признаков	В большинстве своем являются составной частью грядово-мочажинно-озеркового и грядово-озеркового комплексных микроландшафтов. В других болотных микроландшафтах они встречаются реже в виде отдельных водоемов. Берега, как правило, торфяные, низкие, иногда пред-	В отличие от озер, они, как правило, вторичного образования, значительно меньшего размера и расположены чаще всего группами. Встречаются исключительно на моховых болотах с выпуклой формой поверхности. Они образуются при выклинивании или скоплении грунтовых вод в местах резкого

1	2	3	4	5	6	7	8
	рис. 1.7,б – 1, рис. 1.8,б – 1, см. цв. вкладку)	(рис. 1.7,б – А, см. цв. вкладку)	ответствует их пространственному разрешению (рис. 1.6,а – 2, рис. 1.7,а – 1, рис. 1.8,а – 1, см. цв. вкладку)	На водораздельных участках болот линии стекания направлены в разные стороны относительно водораздельной линии углом (рис. 1.7,а – А, см. цв. вкладку)		ставляют собой очень топкие сплавины. Дно торфяное, преимущественно ровное со слабым понижением к центральной части	перелома и уменьшения уклона поверхности на пологих склонах или у подножья выпуклых моховиков
II. Водотоки							
Реки и ручьи	Реки и ручьи выделяются на снимке в виде темно-серых или черных извилистых узких линий (иногда прерывистых) на более светлом фоне болота (рис. 1.8,б – 2, рис. 1.9,б – 2, рис. 1.10,б – 1, рис. 1.11,б – 3, рис. 1.12,б – 1, см. цв. вкладку). Вдоль них часто наблюдается полоса зернистого рисунка с лесным микроландшафтом, которые нередко закрывают русло ручьев кронами (рис. 1.6,б – 3, см. цв. вкладку)	Линии стекания поверхностного стока направлены вдоль водотока вниз по уклону (рис. 1.6,б – В, рис. 1.8,б – Б, рис. 1.9,б – Б, рис. 1.10,б – А, рис. 1.11,б – В, рис. 1.12,б – А, см. цв. вкладку)	Болотные ручьи не выделяются на КС по прямым признакам. Иногда их можно выделить только по косвенным дешифровочным признакам на снимке – по полосе растительности окружающей ручьи в виде темно-бурых, почти черных, розовых или темно-зеленых полосок, или в период весеннего половодья при разливах рек (рис. 1.6,а – 3, рис. 1.8,а – 2, рис. 1.9,а – 2, рис. 1.10,а – 1, рис. 1.11,а – 3, рис. 1.12,а – 1, см. цв. вкладку)	Линии стекания поверхностного стока направлены вдоль водотока вниз по уклону (рис. 1.6,а – В, рис. 1.8,а – Б, рис. 1.9,а – Б, рис. 1.10,а – А, рис. 1.11,а – В, рис. 1.12,а – А, см. цв. вкладку)	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Определение направления потока требует привлечения других признаков	Русла рек и ручьев обычно хорошо выражены и на аэрофотоснимках легко дешифрируются по находящимся около них полоскам леса. Ширина ручьев преимущественно 0,5–3 м, глубина 0,6–1 м. берега их торфяные, обрывистые. Однако среди них нередко встречаются и водотоки с частично или полностью погребенными в торфе руслами	Реки и ручьи, в отличие от остальной гидрографической сети на болотах, характеризуются наличием русла. Они встречаются на болотах всех типов и могут быть первичного и вторичного образования. Первичные реки, протекая по ложбинам дна болотных систем, разделяют отдельные болотные массивы. Исток их нередко лежит далеко за пределами болота, в других случаях их питание идет из проточных топей на болоте. Реки и ручьи вторичного происхождения, образовались на более поздних стадиях развития болот как результат неравномерного роста отдельных частей болотных массивов. Берут начало из внутриболотных озер или питаются топями. Впадают они часто в озера, расположенные на болоте, иногда переходят в топи или теряются на болоте. Они берут начало на болотах и впадают во внутренние водоприемники, а иногда теряются или переходят в слабопроточные топи

1	2	3	4	5	6	7	8
III. Лесные							
Сосново-сфагново-кустарничковые	Тон снимка темно-серый. Основным признаком лесного болота является мелкая однородная зернистость рисунка в сравнении с рисунком окружающих лесов на суходолах. Переход от более светлого тона проекций крон к затемненным промежуткам постепенный. Форма проекций крон овальная, размеры их не варьируют (рис. 1.6,б – 3, рис. 1.11,б – 4, рис. 1.13,б – 5, см. цв. вкладку)	На общем фоне фильтрационного стока с болотного массива к суходолу обычно встречаются суходольные острова (рис. 1.13,б – 3, см. цв. вкладку). В этом случае линии стекания направлены перпендикулярно к границе болота с суходолом. Также на общем фоне иногда наблюдаются едва заметные расходящиеся к границе болота неширокие полосы с меньшей зернистостью (рис. 1.6,б – В, рис. 1.11,б – Г, рис. 1.13,б – Г, см. цв. вкладку)	Изображаются темно-зеленым цветом (рис. 1.6,а – 3, рис. 1.11,а – 4, рис. 1.13,а – 5, см. цв. вкладку)	На общем фоне болотного микроландшафта на окрайках обычно встречаются небольшие суходольные острова (рис. 1.13,а – 3, см. цв. вкладку). В этом случае линии стекания направлены перпендикулярно к границе болота с суходолом. Также иногда наблюдаются едва заметные расходящиеся к границе болота неширокие полосы с светло-зеленым, светло-розовым или зеленовато-голубым цветом (рис. 1.6,а – В, рис. 1.11,а – Г, рис. 1.13,а – Г, см. цв. вкладку)	Достоверность признака зависит от степени обзорности изучаемого микроландшафта и возможности использования других дополнительных признаков (расположение ручьев, топей, минеральных островов, смежных микроландшафтов), характеризующих общую структуру мезоландшафта	Древостой состоит из сосны высотой 4–10 м; при наличии близкого залегания проточных грунтовых вод примешивается береза. Микро-рельеф кочковатый. Общее проективное покрытие кустарничкового яруса составляет 60–90%. В кустарничковом ярусе преобладают: хамедафне, багульник, брусника, голубика. Моховой покров сплошной и состоит из сфагновых мхов (<i>Sphagnum fuscum</i> , <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Sph. angustifolium</i>), встречаются кустистые напочвенные лишайники из родов <i>Cladina</i> и <i>Cladonia</i>	Представляет собой широко распространенный в Западной Сибири тип олиготрофных лесных болот с хорошо развитым древесным ярусом, известный под названием «рослый рям». Встречаются в виде небольших отдельных болот на песчаных почвах. Чаще располагаются не большими площадями на окрайках болотных массивов, а также вдоль рек и вокруг крупных озер. Водное питание складывается из бедных грунтовых и атмосферных вод
IV. Мохово-лесные							
Сфагново-кустарничково-сосновые	Темно-серый фон. На аэрофото-снимках они отчетливо видны по наличию проекции деревьев и теней. Зернистость мелкая, заметна штриховатость в изображении зернистости, создаваемая падающими от деревьев тенями на фоне слабогубчатой структуры (рис. 1.6,б – 4, рис. 1.8,б – 3, рис. 1.9,б – 3,	На рямах радиально расходящиеся более светлые полосы, с меньшей зернистостью по сравнению с равномерным зернистым рисунком всего ряма указывают на направление стока с него (рис. 1.6,б – Г, рис. 1.8,б – В, Д, рис. 1.9,б – В, рис. 1.10,б – Б, рис. 1.11,б – А, рис. 1.12,б – Б, рис. 1.13,б – А, рис. 1.14,б – А, рис. 1.15,б – Б, рис. 1.16,б – В,	Изображаются светло-зеленым цветом (рис. 1.6,а – 4, рис. 1.8,а – 3, рис. 1.9,а – 3, рис. 1.10,а – 2, рис. 1.11,а – 1, рис. 1.12,а – 2, рис. 1.13,а – 1, рис. 1.14,а – 1, рис. 1.15,а – 2, рис. 1.16,а – 3, рис. 1.17,а – 1, см. цв. вкладку)	На общем фоне болотного микроландшафта на склоновых участках наблюдаются расходящиеся к границе болота неширокие полосы с чередованием розового, зеленовато-голубого и светло-фиолетового цветов (рис. 1.6,а – Г, рис. 1.8,а – В, рис. 1.9,а – В, Д, рис. 1.10,а – Б, рис. 1.11,а – А, рис. 1.12,а – Б, рис. 1.13,а – А, рис. 1.14,а – А, рис. 1.15,а – Б, рис. 1.16,а – В, рис. 1.17,а – А, см. цв. вкладку)	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Для определения направления потока привлекаются дополнительные признаки: расположение ручьев (рек), топей и структуры прилегающих микроландшафтов	Древостой редкий, состоит из сосны высотой 2–4 м., сомкнутость крон 0,3–0,4 м. Микро-рельеф волнисто-кочковатый. Травяно-кустарничковый ярус состоит из багульника, хамедафне, голубики, морозики, клюквы, покрытие составляет 40–80%. Кустарнички растут преимущественно на моховых повышениях; в понижениях встречается пушица. Моховой ярус сплошной, из сфагновых	Типичный для лесной зоны Западной Сибири олиготрофный болотный ландшафт, известный под названием «рям». Приурочены к более дренированным участкам болот. Распространены на склонах, вдоль водотоков, вокруг озер. Распространены в условиях атмосферного и бедного грунтового питания на окраинах верховых болот вдоль минеральных берегов

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
	рис. 1.10,б – 2, рис. 1.11,б – 1, рис. 1.12,б – 2, рис. 1.13,б – 1, рис. 1.14,б – 1, рис. 1.15,б – 2, рис. 1.16,б – 3, рис. 1.17,б – 1, см. цв. вкладку)	рис. 1.17,б – А, см. цв. вкладку)				мхов, с господством <i>Sphagnum fuscum</i> , <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Sph. angustifolium</i> , встречаются кусти- стые напочвенные лишайники из родов <i>Cladina</i> и <i>Cladonia</i>	
Сфагново-кустарничково-сосновые, с обилием лишайника	Тон снимка серый. Зернистость мелкая, с многочисленными белыми вкраплениями зернистой структуры лишайниковой растительности (рис. 1.7,б – 2, рис. 1.13,б – 2, рис. 1.17,б – 2, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены в разные стороны относительно водораздельной линии (рис. 1.7,б – А, рис. 1.13,б – Б, рис. 1.17,б – Б, см. цв. вкладку)	Изображаются голубым оттенком на приподнятых водораздельных участках в центральных частях болот, реже на склоновых участках. Голубой цвет этому микроландшафту дает лишайниковая растительность, которая на водораздельных участках имеет большее проективное покрытие (рис. 1.7,а – 2, рис. 1.13,а – 2, рис. 1.17,а – 2, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены в разные стороны относительно водораздельной линии (рис. 1.7,а – А, рис. 1.13,а – Б, рис. 1.17,а – Б, см. цв. вкладку)	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Для определения направления потока привлекаются дополнительные признаки, относящиеся к структуре мезоландшафта	Древесный ярус сильно разрежен, состоит из сосны 2–4 м, растет небольшими группами (по 2–3 дерева) или по одиночке. Микрорельеф волнисто-кочковатый. Травяно-кустарничковый состоит из багульника, хамедафне, голубики, клюквы, морошки, пушицы, покрытие составляет 20–50%. Кустарнички растут преимущественно на моховых повышениях; в понижениях встречается морошка, пушица. Моховой ярус сплошной, из сфагновых мхов, с господством <i>Sphagnum fuscum</i> , <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Sph. angustifolium</i> . Около 60% поверхности боков кочек и межкочечных понижений занято лишайниками из родов <i>Cladina</i> и <i>Cladonia</i> . Доминантами являются <i>Cladina stellaris</i> , <i>C. Rangiferina</i>	В основном занимают приподнятые участки в центральных частях болот, реже на склонах. Водно-минеральное питание атмосферное

1	2	3	4	5	6	7	8
V. Моховые редко облесенные							
Сфагново-пушицево-кустарничковые редко облесенные сосной, с обилием сухостоя	Светло-серый фон с светлыми вкраплениями. Зернистость мельче, чем у сфагново-кустарничково-сосновых микроландшафтов, но менее ровная, с заметной штриховатостью (рис. 1.12,б – 3, см. цв. вкладку)	На общем фоне фильтрационного стока с болотного массива к суходолу обычно встречаются небольшими участками на окрайках. В этом случае линии стекания направлены перпендикулярно к границе болота с суходолом. Также на общем фоне иногда наблюдаются более светлые вытянутости, направленные к границе болота и указывающие на направление стока. Линии стекания проводятся вдоль основного направления светлых полос (рис. 1.12,б – В, см. цв. вкладку)	Бело-голубой цвет с небольшими пятнами светло-розового цвета (рис. 1.12,а – 3, см. цв. вкладку)	На общем фоне болотного микроландшафта линии стекания направлены перпендикулярно к границе болотного массива. Иногда прослеживаются вытянутости, направленные к границе болота и указывающие на направление стока. Линии стекания проводятся вдоль основного направления светлых полос (рис. 1.12,а – В, см. цв. вкладку)	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Определение направления потока требует привлечения других признаков	Древесный ярус из угнетенной сосны высотой 0,5–1,5 м, с обилием сухостоя, который составляет 30–50%. Микрорельеф кочковатый, занимают до 50% площади микроландшафта. Травяно-кустарничковый ярус сомкнутостью 60–80% представлен в основном хамедафной со значительной примесью пушицы, карликовой березы, морошки. Моховой покров сплошной, из сфагновых мхов, с господством <i>Sphagnum fuscum</i> , <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Sph. angustifolium</i>	Занимают небольшие участки по окраинам болот, а также окружают минеральные острова на болотах в условиях незначительного периодического подтопления стекающими с верховых массивов болотными водами
VI. Мохово-травяные							
Сфагново-осоковые и сфагново-осоково-пушицевые	Тон снимка светлый, местами почти белый. Рисунки в основном гладкий, местами заметна серая штриховатость кустарничков. Наблюдаются расходящиеся или сходящиеся очертания границ топяных микроландшафтов на фоне основного микроландшафта, имеющего другую структуру, на окрайках нередко образуются заходящие в суходолы	Линии стекания направлены вдоль границ сходящегося или расходящегося очертания топяного микроландшафта и по осевой его линии: при расходящейся форме – от точки сосредоточенного выхода потока к середине его линии, на которой исчезают признаки топяного микроландшафта; при сходящейся форме – от середины линии выклинивания потока и к его вершине, где часто расположен исток внутриболотного ручья. Линии стекания в этом случае веерообразно сходятся (рис. 1.6,а – 5, рис. 1.10,а – 3, рис. 1.11,а – 2, рис. 1.13,а – 4, рис. 1.14,а – 2, рис. 1.16,а – 2, рис. 1.17,а – 3, см. цв. вкладку)	Изображаются в виде белесого бледно-розового или белесого бледно-фиолетового цвета (рис. 1.6,а – 5, рис. 1.10,а – 3, рис. 1.11,а – 2, рис. 1.13,а – 4, рис. 1.14,а – 2, рис. 1.16,а – 2, рис. 1.17,а – 3, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены вдоль границ сходящегося или расходящегося очертания топяного микроландшафта и по осевой его линии: при расходящейся форме – от точки сосредоточенного выхода потока к середине его линии, на которой исчезают признаки топяного микроландшафта; при сходящейся форме – от середины линии выклинивания потока и к его вершине, где часто расположен исток внутриболотного ручья. Линии стекания в этом случае веерообразно сходятся (рис. 1.6,а – Д, рис. 1.10,а – В, рис. 1.11,а – Б, рис. 1.13,а – В, рис. 1.14,а – Б, рис. 1.16,а – Б, рис. 1.17,а – В, см. цв. вкладку)	Признак определяет совершенно достоверно ориентацию линий стекания. Направление потока определяется достоверно при привлечении дополнительных сопряженных признаков: при сходящейся топи выклинивания – наличие в ее узком конце истока ручья; при расходящихся топах выклинивания – наличие в начале топи точек наиболее темного фона с постепенным посветлением фона топяного микроландшафта в направ-	Микрорельеф ровный, с редкими полными кочками. Травостой состоит из осок, пушицы с небольшой примесью шейхцерии и болотных кустарничков (подбел, клюква). Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 40–60%. Моховой покров плотный, из сфагновых мхов (<i>Sphagnum magellanicum</i> , <i>Sph. angustifolium</i> , <i>Sph. balticum</i> , <i>Sph. majus</i> , <i>Sph. fallax</i>)	Обычно формируются по периферии, узкими полосами встречаются вокруг минеральных островов. По таким топям происходит сброс вод с болот в речную сеть. Питаются бедными поверхностно-сточными водами с олиготрофных торфяников, реже, в случае периферийного залегания, – слабоминерализованными грунтовыми водами

1	2	3	4	5	6	7	8
	«зализы» в форме «языков» (рис. 1.6,б – 5, рис. 1.10,б – 3, рис. 1.11,б – 2, рис. 1.13,б – 4, рис. 1.14,б – 2, рис. 1.16,б – 2, рис. 1.17,б – 3, см. цв. вкладку)	ручья (рис. 1.6,б – Д, рис. 1.10,б – В, рис. 1.11,б – Б, рис. 1.13,б – В, рис. 1.14,б – Б, рис. 1.16,б – Б, рис. 1.17,б – В, см. цв. вкладку)			лении расходящегося потока воды		
Сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи	В основном встречаются на окрайках болот, образуют заходящие в суходолы «зализы» в форме «языков» с серым гладким рисунком (рис. 1.8,б – 5, рис. 1.14,б – 3, см. цв. вкладку). В случаях, когда вода стоит на поверхности, отображается в виде мазков черного цвета на общем светлом фоне (рис. 1.8,б – 6, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены вдоль границ топяного микроландшафта. По ширине топи густота линий стекания распределяется пропорционально ее ширине в данном месте, указывая на схождение или расхождение потока (рис. 1.8,б – Д, рис. 1.14,б – В, см. цв. вкладку)	На окрайках болот эти микроландшафты образуют заходящие в суходолы «зализы» в форме своеобразных «языков» красно-оранжевого цвета (рис. 1.8,а – 5, рис. 1.14,а – 3, см. цв. вкладку). В случае, когда вода стоит на поверхности, эти микроландшафты изображаются в виде черного, темно-синего или темно-бурого цвета (рис. 1.8,а – 6, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены вдоль границ топяного микроландшафта. По ширине топи густота линий стекания распределяется пропорционально ее ширине в данном месте, указывая на схождение или расхождение потока (рис. 1.8,а – Д, рис. 1.14,а – В, см. цв. вкладку)	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Для определения направления потока необходимо привлечь другие сопряженные признаки: места образования в топи ручьев и выхода их за пределы границ массива, расположение внешних рек – водоприемников болотных вод	Эти микроландшафты характеризуются сильной обводненностью, средний уровень грунтовых вод на них почти всегда стоит близко к поверхности мохового покрова, верхние слои торфяной залежи перенасыщены водой сверх полной влагоемкости и часто находятся во взвешенном состоянии. Микрорельеф ровный, с отдельными понижениями. Общее проективное покрытие травяного яруса 50%. В разной степени представлен осокой топяной, вахтой, шейхцерией. Моховой ярус сомкнутостью 80–100% рыхлый, местами встречаются небольшие участки открытой водной поверхности. Среди сфагновых мхов встречаются <i>Sphagnum obtusum</i> , <i>Sph. majus</i> , <i>Sph. fallax</i> , <i>Sph. balticum</i> , <i>Sph. angustifolium</i>	Обычно формируются по периферии, образуют заходящие в суходолы «зализы» в форме «языков». По таким топиям происходит сброс вод с болот в речную сеть. Питаются бедными поверхностно-сточными водами с олиготрофных торфяников, нередко, в случае периферийного залегания, – слабоминерализованными грунтовыми водами

1	2	3	4	5	6	7	8
Сфагново-шейхцериево-осоковые топи	Тон снимка серый. Рисунок в основном гладкий, местами заметна серая штриховатость пологих гряд и кочек (рис. 1.8,б – 4, рис. 1.10,б – 4, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены вдоль границ топяного микроландшафта и перпендикулярно едва намечающимся грядам. По ширине топи густота линий стекания распределяется пропорционально ее ширине. (рис. 1.8,б – Г, рис. 1.10,б – Г, см. цв. вкладку)	Изображаются в виде однородного малинового цвета (рис. 1.8,а – 4, рис. 1.10,а – 4, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены вдоль границ топяного микроландшафта. По ширине топи густота линий стекания распределяется пропорционально ее ширине (рис. 1.8,а – Г, рис. 1.10,а – Г, см. цв. вкладку)	Признак достоверный для ориентации линий стекания. Определение направления потока воды требует использования дополнительных признаков, относящихся к структуре мезоландшафта	Микрорельеф ровный, обводненный, редко встречаются пологие кочки. В целом поверхность топи представляет собой систему обширных незамкнутых мочажин с вкраплением намечающихся пологих гряд и кочек с преобладанием подбела, встречается клюква. Общее проективное покрытие травяного яруса не превышает 40–50%. Представлен шейхцерией, осокой топяной, еденично вахтой. Моховой ярус сплошной. Среди сфагновых мхов встречаются <i>Sphagnum majus</i> , <i>Sph. fallax</i> , <i>Sph. balticum</i> , <i>Sph. angustifolium</i>	Представляют собой обводненные топи, которые широкими полосами (в поперечнике несколько сот метров) тянутся от крупных озер или минеральных островов вдоль уклонов поверхности болот, образуются в ложбинах между мезоландшафтами. Обычно они заканчиваются ручейками или болотными речками
VII. Комплексные моховые (с расчлененным микрорельефом)							
1. Грядово-мочажинные комплексы:	Извилисто-полосатый рисунок. Полосы расположены перпендикулярно общему уклону поверхности болота и подчеркивают выпуклую (центр концентрических полос совпадает с генетическим центром), ровную с незначительным общим уклоном на склонах крупных болотных систем (параллельная полоса-	Линии стекания направлены перпендикулярно общему направлению извилистых полос гряд и мочажин			Признак совершенно достоверный, но определяется только ориентация линий стекания. Определение направления потока воды требует использования дополнительных признаков, относящихся к структуре мезоландшафта или макроландшафта	Гряды составляют 30–80% площади комплекса. Поверхность гряд имеет волнистый и кочковатый микрорельеф. Ширина гряд изменяется от 1 до 10 м, в зависимости от приуроченности участка и уклонов поверхности болот. Гряды обычно облесены сосной высотой 1–2 м, отдельные деревья достигают высоты 3–3,5 м. Встречается в обилии сухостой, который иногда составляет до	Занимают значительные площади на болотных массивах. Приурочены к склонам, реже к центральным частям болотных массивов. Грядово-мочажинные комплексы всех типов связаны друг с другом взаимными переходами в зависимости от колебания величины и направления стока воды. Водно-минеральное питание атмосферное, проточное

1	2	3	4	5	6	7	8
	тость, часто с обратной концентричностью (полос), а также плоскую (неориентированность полос) поверхность					50% древесного яруса. В травяно-кустарничковом ярусе сомкнутостью 60–80% преобладают багульник, хамедафне, изредка встречаются подбел, клюква, морошка, угнетенная голубика, в местных понижениях преобладает пушица. Моховой покров сплошной, преобладает <i>Sphagnum fuscum</i> , встречаются лишайники. Мочажины различаются по степени обводненности и составу растительности	
Грядово-мочажинные со сфагново-пушицевыми и сфагново-пушицево-шейхцериевыми мочажинами	Темно-серый густой сетчатый рисунок с мелкой зернистостью гряд закономерно чередуется со светло-серыми гладкими полосами с хорошо выраженными границами. Ясно наблюдается концентричность гряд и их перпендикулярность направлению наибольшего уклона поверхности. Площадь темно-серых с зернистостью гряд обычно превышает площадь светло-серых мочажин (рис. 1.6,б – 6, рис. 1.8,б – 7, 8,	(рис. 1.6,б – Г, рис. 1.8,б – В, Д, рис. 1.9,б – Г, рис. 1.10,б – Б, рис. 1.11,б – А, рис. 1.12,б – Г, рис. 1.13,б – Д, рис. 1.14,б – А, рис. 1.15,б – Б, рис. 1.16,б – Г, рис. 1.17,б – Г, см. цв. вкладку)	Изображаются в виде длинных нешироких полос с чередованием розового, зеленовато-голубого и светло-фиолетового цветов, расходящихся от центральных частей болот или сменяющих более обводненные микроландшафты по направлению к окраинам (рис. 1.6,а – 6, рис. 1.8,а – 7, 8, рис. 1.9,а – 4, рис. 1.10,а – 5, рис. 1.11,а – 5, рис. 1.12,а – 4, рис. 1.13,а – 6, рис. 1.14,а – 4, рис. 1.15,а – 3, рис. 1.16,а – 4, рис. 1.17,а – 4, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены по осевой линии расходящихся к границе болота нешироких полос (рис. 1.6,а – Г, рис. 1.8,а – В, Д, рис. 1.9,а – Г, рис. 1.10,а – Б, рис. 1.11,а – А, рис. 1.12,а – Г, рис. 1.13,а – Д, рис. 1.14,а – А, рис. 1.15,а – Б, рис. 1.16,а – Г, рис. 1.17,а – Г, см. цв. вкладку)		Площадь мочажин со сфагново-пушицевым микроландшафтом составляет 30–40% площади комплекса. Мочажины имеют слабовытянутую форму, ширина их 2–5 м, длина 5–10 м. микрорельеф в мочажинах кочковатый. Травяной ярус сомкнутостью 40–50% состоит преимущественно из пушицы. Моховой покров сплошной, более рыхлый, чем на грядах, состоит из сфагновых мхов: <i>Sphagnum angustifolium</i> , <i>Sph. balticum</i> , <i>Sph. majus</i> . Сфагново-пушицево-шейхцериевые мочажины встречаются	Приурочены к окраинам и склонам болотных систем

1	2	3	4	5	6	7	8
	рис. 1.9,б – 4, рис. 1.10,б – 5, рис. 1.11,б – 5, рис. 1.12,б – 4, рис. 1.13,б – 6, рис. 1.14,б – 4, рис. 1.15,б – 3, рис. 1.16,б – 4, рис. 1.17,б – 4, см. цв. вкладку)					в переходной полосе, где происходит смена сфагново-пушицевых мочажин сфагново-шейхцериевыми. Площадь этого микроландшафта составляет около 50% от площади комплекса. Мочажины имеют вытянутую форму, расположены параллельно грядам. Ширина мочажин 5–7 м, длина 15–20 м, в травяном ярусе сомкнутостью 40–50% преобладает пушица, ближе к центру мочажины – шейхцерия. По краям мочажин встречается подбел, клюква. В моховом ярусе сплошной покров образует <i>Sphagnum balticum</i> , <i>Sph. majus</i> , <i>Sph. angustifolium</i>	
Грядово-мочажинные со сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцериово-осоковыми и сфагново-осоково-очеретниковыми мочажинами	Темно-серый сетчатый рисунок с мелкой зернистостью гряд закономерно чередуется с более темным, чем у предыдущих микроландшафтов, гладкими полосами мочажин. Наблюдается концентричность гряд и их перпендикулярность направлению наибольшего уклона поверхности. Площадь темно-серых с зернистостью гряд	(рис. 1.6,б – Е, рис. 1.8,б – Е, рис. 1.9,б – Г, рис. 1.10,б – Д, рис. 1.11,б – Д, рис. 1.13,б – Е, рис. 1.14,б – Г, рис. 1.15,б – В, рис. 1.16,б – Д, рис. 1.17,б – Д, см. цв. вкладку)	Изображаются в виде длинных различной ширины полос с фиолетовым и темно-фиолетовым цветом, расходящихся от центральных частей болот по направлению к окраинам болот (рис. 1.6,а – 7, рис. 1.8,а – 9, рис. 1.9,а – 5, рис. 1.10,а – 6, рис. 1.11,а – 6, рис. 1.13,а – 7, рис. 1.14,а – 5, рис. 1.15,а – 4, рис. 1.16,а – 5, рис. 1.17,а – 5, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены по осевой линии расходящихся к границе болота полос. Довольно часто комплекс имеет сходящиеся линии стекания. Линии стекания в этом случае веерообразно сходятся (рис. 1.6,а – Е, рис. 1.8,а – Е, рис. 1.9,а – Г, рис. 1.10,а – Д, рис. 1.11,а – Д, рис. 1.13,а – Е, рис. 1.14,а – Г, рис. 1.15,а – В, рис. 1.16,а – Д, рис. 1.17,а – Д, см. цв. вкладку)		Площадь мочажин со сфагново-шейхцериевыми микроландшафтами составляет 30–60% площади комплекса. Мочажины имеют вытянутую форму, шириной 5–15 м, длиной 50–100 м, часто они соединяются между собой. Травяной ярус разрежен (сомкнутость 30%), господствует шейхцерия, по краям мочажин встречаются осока топяная и очеретник. Моховой ярус сплошной, рыхлый, из <i>Sphagnum majus</i> , <i>Sph. jensenii</i> .	Грядово-мочажинные комплексы с сильно обводненными мочажинами приурочены к склонам и центральным частям болотных систем, также при мощном потоке болотных вод выходят к окрайкам

1	2	3	4	5	6	7	8
	обычно одинаковая с площадью серых мочажин (рис. 1.6,б – 7, рис. 1.8,б – 9, рис. 1.9,б – 5, рис. 1.10,б – 6, рис. 1.11,б – 6, рис. 1.13,б – 7, рис. 1.14,б – 5, рис. 1.15,б – 4, рис. 1.16,б – 5, рис. 1.17,б – 5, см. цв. вкладку)					Сфагново-шейхцери-ево-осоковые мочажины распространены на более обводненных склонах олиготрофных болот. Они занимают 30–60% площади грядово-мочажинного комплекса. Мочажины имеют вытянутую форму шириной 10–30 м, длиной 50–100 м, травяной ярус разрежен, представлен шейхцерией и осокой топяной, причем шейхцерия растет на окрайках мочажин, а осока – в более топяных центральных участках. Моховой покров сплошной, рыхлый, насыщен водой. Составляет из сфагновых мхов <i>Sphagnum majus</i>, <i>Sph. jensenii</i>. Сфагново-осоково-очеретниковые мочажины занимают 50% и более площади комплекса. Мочажины большой площади, вытянутой формы, длиной от десятков до сотен метров. Травяной ярус разреженный осокой топяной, очеретником; встречаются пятна вахты и оголенного торфа; последние занимают до 30% площади мочажин. Проктивное покрытие	

1	2	3	4	5	6	7	8
						мохового покрова составляет 70–100%, рыхлый, насыщен водой. Состоит из сфагновых мхов <i>Sphagnum majus</i> , <i>Sph. jenssenii</i> , <i>Sph. lindbergii</i>	
Грядово-мочажинные со сфагново-осоково-шейхцериево-вахтовыми мочажинами	Образует рисунок сетки с ячейками вытянутых очертаний, что обусловлено ориентацией гряд перпендикулярно направлению стока. Светло-серый рисунок гряд закономерно чередуется с обводненными мочажинами черного цвета (вода стоит на поверхности мочажин). Микроландшафт имеет выраженные границы, часто заканчивается черной извилистой узкой полоской ручья или мохово-травяными топиями (рис. 1.14,б – 6, 7, рис. 1.15,б – 1, см. цв. вкладку)	(рис. 1.14,б – Д, Е, рис. 1.15,б – А, см. цв. вкладку)	Изображаются в виде резко очерченных черных и темно-бурых или темно-синих полос стока (рис. 1.15,а – 1, рис. 1.14,а – 6, 7, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены вдоль границ топяного микроландшафта. По ширине топи густота линий стекания распределяется пропорционально ее ширине в данном месте, указывая на схождение или расхождение потока (рис. 1.15,а – А, рис. 1.14,а – Д, Е, см. цв. вкладку)		Гряды занимают 40–50% поверхности. Высота гряд 0,2–0,35 м, шириной 1–2 м. В травяно-кустарничковом ярусе сомкнутостью 60–80% преобладают пушица, багульник, хамедафне, изредка встречается морошка. Моховой покров образует <i>Sphagnum fuscum</i> , <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Sph. angustifolium</i> . Мочажины сильно обводненные, имеют вытянутую форму шириной 3–10 м, длиной 50–100 м. Обычно на их поверхности скапливается вода. Проективное покрытие травяного яруса составляет около 50%. Представлен шейхцерией, осокой топяной и вахтой трехлистной. Моховой покров рыхлый, насыщен водой. Состоит из сфагновых мхов <i>Sphagnum balticum</i> , <i>Sph. majus</i> , <i>Sph. obtusum</i> , <i>Sph. majus</i> , <i>Sph. fallax</i>	В местах транзитных и водосборных топей, где происходит сброс вод, стекающих с выпуклых олиготрофных участков и на контактах с топиями выклинивания образуется грядово-мочажинный топяной микроландшафт в местах незначительного понижения в рельефе и увеличения уклона поверхности болота. Обеспечены постоянным стоком за счет выклинивания вод с прилегающих выпуклых массивов

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
2. Грядово-мочажинно-озерковые и грядо-во-озерковые	Темно-серый рисунок с мелкой зернистостью гряд закономерно чередуется с серыми гладкими полосами мочажин и черными пятнами озерков разной формы и размеров. Здесь прослеживается определенная закономерность в распределении озер: центральные части болотных систем заняты наиболее крупными озерами, часто округлой формы, без определенной закономерности в распределении. По мере продвижения по склону размер озер уменьшается, плановые очертания их приобретают вытянутую форму по направлению наибольшего уклона поверхности (рис. 1.7,б – 3, см. цв. вкладку)	Линии стекания направлены перпендикулярно общему направлению полос. На водораздельных участках линии стекания имеют противоположное направление или встречаются под прямым или острым углом (рис. 1.7,б – А, см. цв. вкладку)	Изображаются в виде преимущественно фиолетового и темно-фиолетового цветов, чередующихся с черными пятнами разной формы и размеров озерков и светло-зеленым и голубым оттенком гряд и сфагново-кустарничково-сосновых, с обилием лишайников микроландшафтов, встречаются также мохово-травяные топяные микроландшафты (рис. 1.7,а – 3, см. цв. вкладку)	На общем фоне болотного микроландшафта на склоновых участках наблюдаются расходящиеся к границе болота полосы преимущественно фиолетового и темно-фиолетового цветов, чередующихся с черными пятнами разной формы и размеров озерков. Линии стекания направлены по осевой линии расходящихся к границе болота полос. На водораздельных участках болот линии стекания направлены в разные стороны относительно водораздельной линии (рис. 1.7,а – А, см. цв. вкладку)	Признак совершенно достоверный, но определяется только ориентация линий стекания. Определение направления потока воды требует использования дополнительных признаков, относящихся к структуре мезоландшафта или макроландшафта	Это своеобразные болотные топи, основная часть которых занята переувлажненными мочажинами шириной до 100 м, длиной до 300 м и озерками. Сильно обводненные мочажины чередуются со вторичными озерками или озерки занимают центральные участки крупных мочажин. Озера имеют вытянутую или округлую форму. Размеры их сильно варьируют. Встречаются как маленькие озерки диаметром 10–20 м, так и крупные озера диаметром 50–100 м и более. Озера и мочажины чередуются с грядами. Гряды облесены сосной с единичными деревьями кедра, высота деревьев 1–4 м. Кустарничковый ярус сомкнутостью 70% состоит из хамедафне и багульника с примесью клюквы, подбела, карликовой березки, морошки. Моховой ярус сплошной, состоит из сфагновых мхов с господством <i>Sphagnum fuscum</i> , пятнами встречаются лишайники.	Широко распространены на олиготрофных болотах. Приурочены обычно к центральным частям болот, реже встречаются на склонах

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
						Мочажины сильно обводнены, трудно-проходимы. Травяной ярус в мочажинах сомкнутостью 40–50% состоит из осоки топяной, очеретника, шейхцерии. По урезу озерков обильно растут вахта, очеретник. Осока и очеретник растут отдельными группами, придавая травяному покрову пятнистость. Моховой ярус разреженный, сомкнутость 70–80%, с пятнами оголенного торфа. Встречаются сфагновые мхи: <i>Sphagnum papillosum</i> , <i>Sph. majus</i> , <i>Sph. balticum</i>	

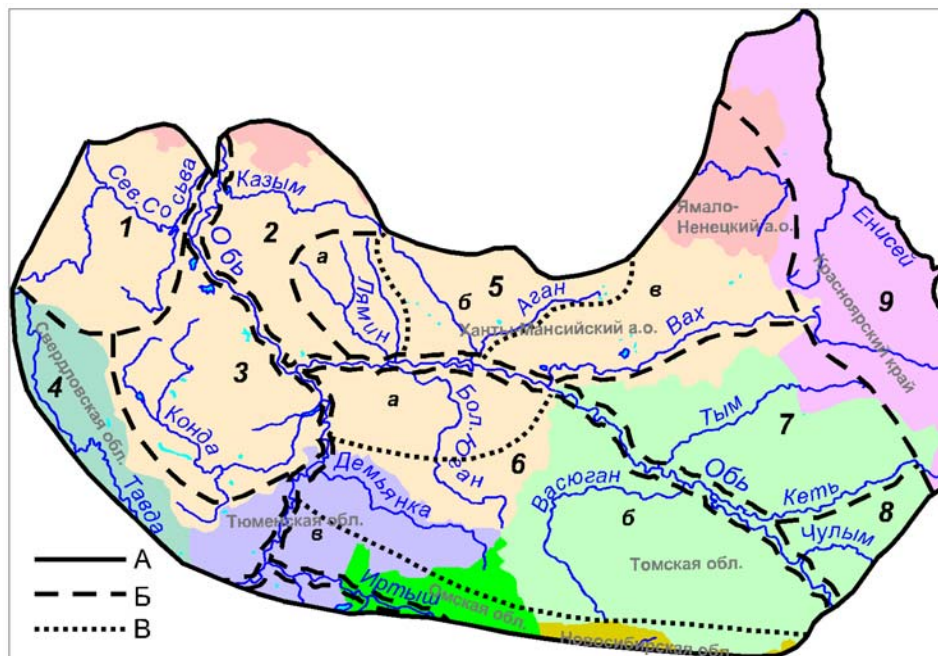
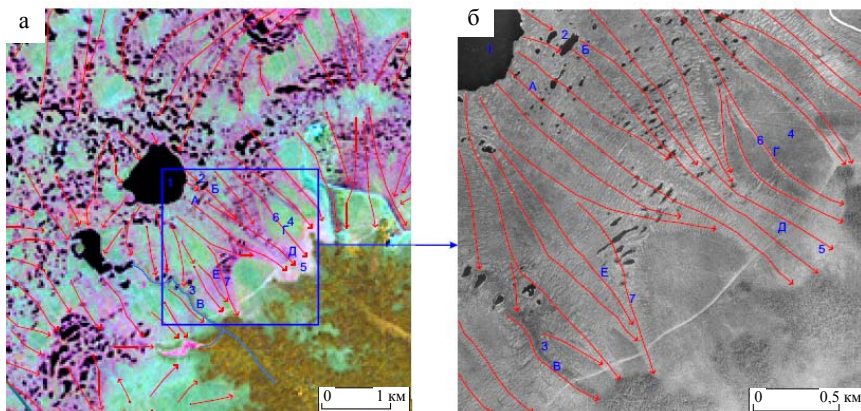


Рис. 1.4. Схема размещения болотных районов на территории зоны выпуклых олиготрофных болот (взято из работы К.Е. Иванова, С.М. Новикова /11/)

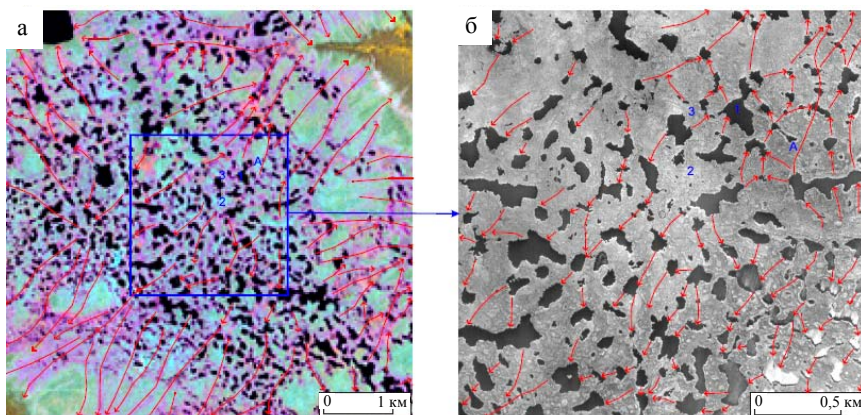
1 – Северососьвинский, 2 – Казымский, 3 – Обь-Кондинский, 4 – Кондр-Тавдинский, 5 – Лямин-Вахский (подрайоны: *a* – Лямин-Пимский, *б* – Пим-Аганский, *в* – Аган-Вахский), 6 – Обь-Иртышский (подрайоны: *a* – Салым-Балыкский, *б* – Демьяно-Васюганский, *в* – Туртас-Иртышский), 7 – Тым-Кетский, 8 – Чулымский, 9 – Приенисейский; А – граница болотной зоны, Б – граница болотных районов, В – граница болотных подрайонов.



— линия стекания, 1, А — дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.6. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

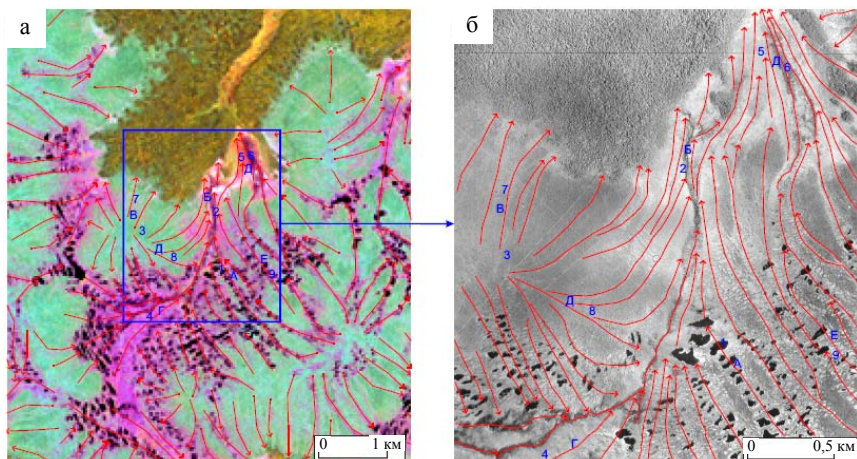
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А — дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.7. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

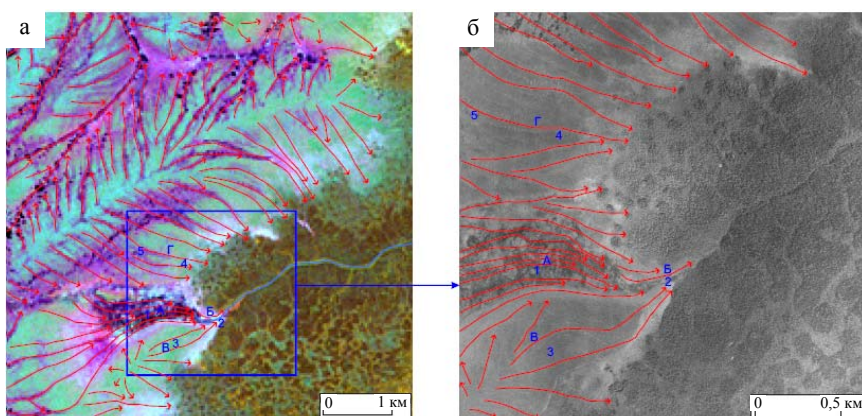
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А – дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.8. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

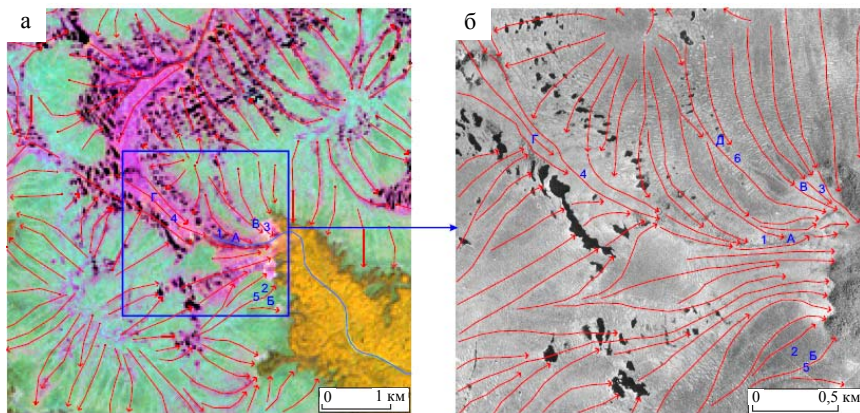
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А – дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.9. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

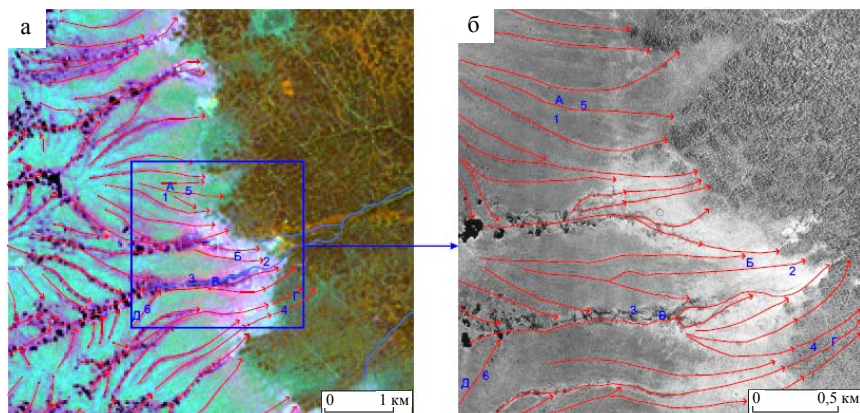
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



→ линия стекания, 1, А – дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.10. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

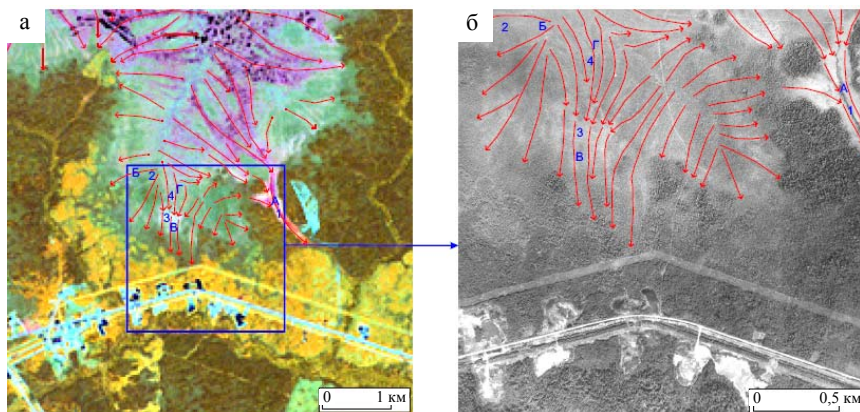
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



→ линия стекания, 1, А – дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.11. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

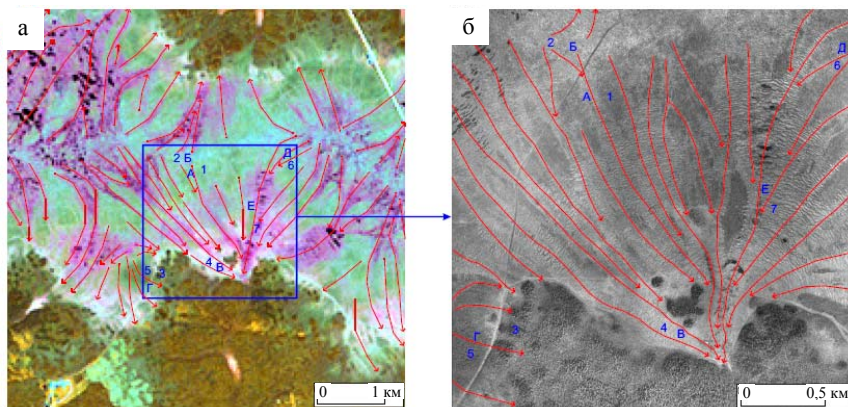
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А — дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.12. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

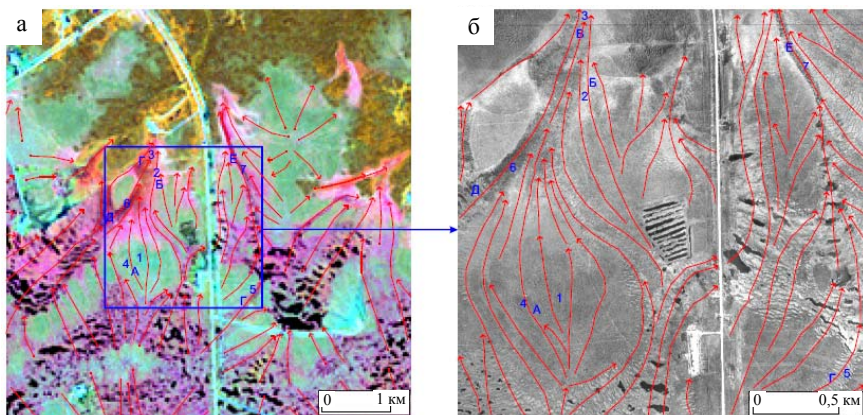
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А — дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.13. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

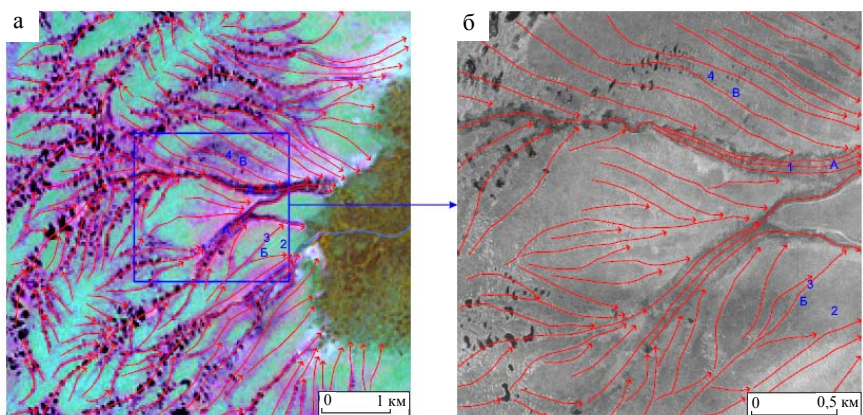
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А – дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.14. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

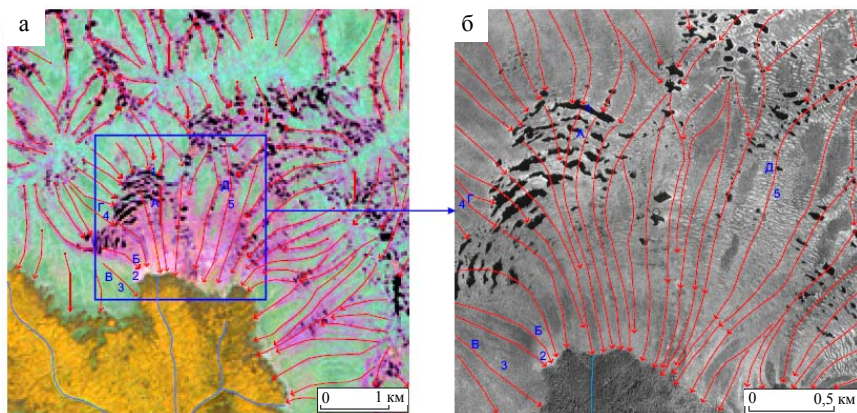
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А – дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.15. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

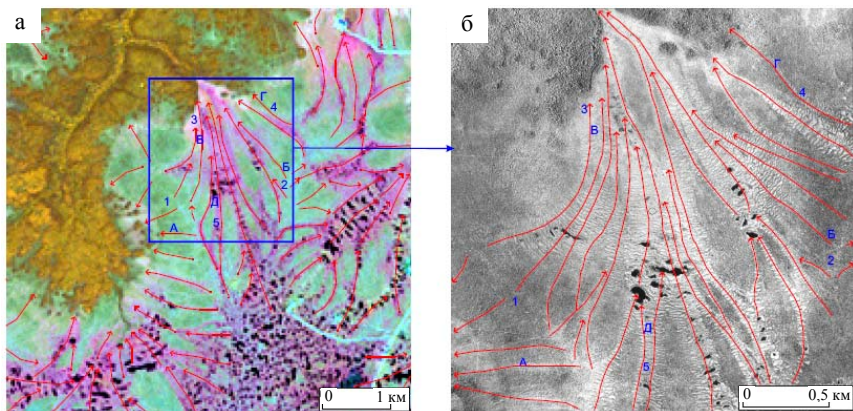
а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А — дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.16. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.



— линия стекания, 1, А — дешифровочные признаки (обозначения даны в табл. 1.1)

Рис. 1.17. Изображения болотных микроландшафтов и ориентировки линий стекания:

а) космический снимок ETM+/Landsat 7 (RGB 4, 5, 3 зоны съемки); б) аэрофотоснимок.

лесными и мохово-лесными болотными микроландшафтами. Расположен на междуречных пространствах рек Оби и Иртыша, в их среднем и нижнем течении. Это крупнейший район болотной зоны /11/.

Район относится к Обь-Иртышской плосковолнистой аллювиально-эрозионной равнине, сложенной озерно-аллювиальными песками и глинами эпохи максимального оледенения /50/. Большая центральная часть района – обширная платообразная равнина, расчлененная речными долинами, расходящимися к западу, северу и востоку. Несколько выделяется северная часть района, представляющая плоскохолмистую местность.

В западной части (вдоль долины р. Иртыша) развиты лессовидные суглинки с выработанными короткими оврагами. Заболоченность всего района 36%.

Болотные системы полностью покрывают водоразделы рек. Площадь таких болотных систем (например Васюганское болото) доходит до нескольких десятков тысяч квадратных километров. Незаболоченные земли располагаются вдоль рек полосами шириной 1,5–5,0 км.

В распределении микроландшафтов по территории болотных систем наблюдается определенная закономерность. Плоские центральные части их заняты в основном грядово-озерковыми комплексами. Склоны заняты грядово-мочажинными комплексами со сфагново-шейхцериевыми обводненными мочажинами. На более крутых склонах расположены лесные и мохово-лесные микроландшафты. Окрайки заняты осоково-сфагновыми и другими сильнообводненными микроландшафтами. В южной части района (Прииртышье) среди выпуклых олиготрофных болотных массивов встречаются обширные площади евтрофно-мезотрофных болотных топей, которые особенно характерны для южных склонов Васюганской болотной системы.

Средняя глубина торфяной залежи 3 м, максимальные глубины 7–9 м, местами до 10–12 м. Верхние горизонты сложены фускум-торфом, глубже залегают слои верхового комплексного и сфагново-пушицевого торфа, местами в придонном слое – древесно-переходные торфа. Исключение составляет южная часть района (Прииртышье), где встречается верховая и низинная (в топях) залежь. В этом районе выделяются три подрайона, границы которых показаны на рис. 1.4 (см. цв. вкладку), а именно: Салым-Балыкский (а), Демьяно-Васюганский (б), Туртас-Иртышский (в).

Салым-Балыкский подрайон занимает северную часть района. Заболоченность его 30%. Здесь встречаются как отдельные болотные массивы, так и крупные болотные системы. Преобладают лесные и мохово-лесные микроландшафты (41%), а также грядово-мочажинные комплексы (38%). Грядово-озерковые комплексы занимают всего 4% площади, моховые и мохово-травяные микроландшафты составляют окрайки болот (17%) /11/.

Демьяно-Васюганский подрайон занимает наибольшую центральную часть района и характеризуется особо крупными олиготрофными болотными системами, которые расположены на водоразделах первого по-

рядка и отдельными языками заходят на водоразделы рек второго порядка. Среди них выделяется хорошо известная в литературе Васюганская болотная система (площадью до 5 млн га). На этих болотах берут свое начало многие реки Обь-Иртышского водораздела: Демьянка, Большой и Малый Балык, Большой и Малый Юган, Васюган и его притоки, Чузик и другие. Заболоченность подрайона 35%. Преобладают по площади грядово-мочажинные (33%) и грядово-озерковые (23%) комплексы. Лесные и мохово-лесные микроландшафты занимают 44% площади болот. В грядово-озерковых комплексах площадь гряд 85%, а озерков 15% /11/. Периферийные участки болот сильно обводнены и являются источником питания многих ручьев и рек.

Туртас-Иртышский подрайон самый южный в районе, наиболее заболочен и обводнен по сравнению с предыдущими подрайонами. Заболоченность территории 45%. Площадь микроландшафтов на болотных системах распределяется следующим образом. Преобладают грядово-мочажинные (28%) и грядово-озерковые (29%) комплексы. Крутые склоны массивов заняты лесными и мохово-лесными микроландшафтами (16%). Отличительной особенностью олиготрофных болот этого подрайона является наличие на них сильнообводненных евтрофных и евтрофно-мезотрофных осоково-гипновых, часто грядово-мочажинных топей, которые занимают 27% площади болот. Указанные топи вытянуты широкими полосами с севера на юг (на южных склонах Большого Васюганского болота). Из них берут свое начало правые притоки Иртыша: Омь, Тара, Шиш, Малый Туртас /11/.

1.3. Формирование стока на болотных массивах

Болотный ландшафт представляет собой сочетание следующих систем: фаций (микроландшафты), урочищ (мезоландшафты), объединений простых болотных массивов (макроландшафты) и внутриболотных водоемов и водотоков, часто и сухоходльных островов и участков. Основой его функционирования является водообмен с окружающими ландшафтами. К важнейшей составляющей водообмена относится сток. Выделяется несколько аспектов его исследования: 1 – горизонтальный фильтрационный сток при разных уровнях грунтовых вод в деятельном горизонте торфяной залежи; 2 – застойные топи, микроозерки, бессточные и проточные внутриболотные озера или места сосредоточения и аккумуляции поверхностных вод; 3 – временные внутриболотные водотоки (проточные топи, сточные озера, ручьи); 4 – постоянная сеть внутриболотных рек. Они являются различными формами процесса стока с болотных систем и играют различную роль в формировании речного стока в болотных ландшафтах (рис. 1.5). Три последних – это элементы внутриболотной гидрографической сети /51, 52/.

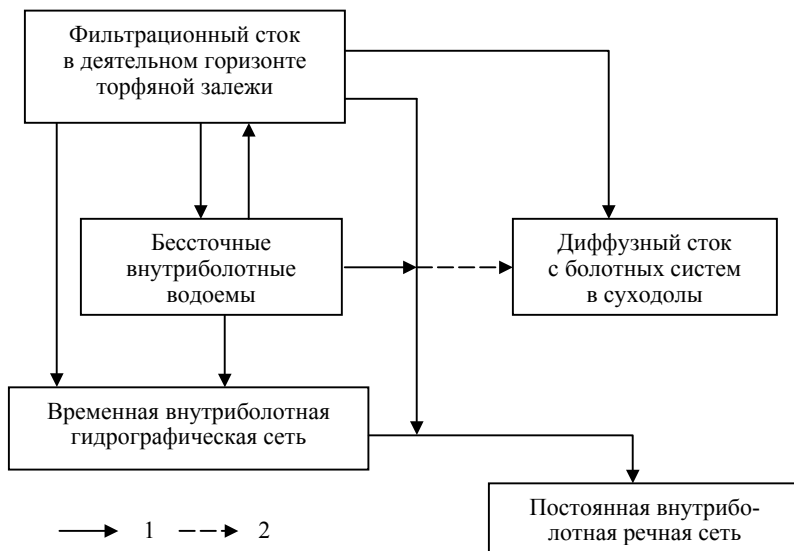


Рис. 1.5. Схема взаимодействия форм стока (взято из работы Т.С. Савельевой /56/):

1 – потоки, преобладающие по площади; 2 – потоки, встречающиеся реже.

В болотных массивах, находящихся в естественном состоянии, выделяются два различных по свойствам горизонта торфяной залежи: верхний – так называемый *активный*, или *деятельный*, горизонт и нижний – *инертный* горизонт, которые резко отличаются по своим физическим свойствам, гидрологическим и биохимическим процессам. Это разделение, введенное по предложению В.Д. Лопатина /53/ на основании проведенных им наблюдений над свойствами торфяной залежи и физически обоснованное также в работах /5, 54, 55/, оказалось весьма важным при изучении гидрологических процессов на неосушенных болотах и их роли в формировании и развитии болотных систем.

К числу основных свойств торфяной залежи относят ботанический состав, степень разложения, пористость, водопроводимость, водоотдачу. Эти величины изменяются по глубине залегания торфа.

Степень изменчивости особенно велика в верхнем, относительно тонком, слое торфа, который характеризуется высокой водопроточной способностью или коэффициентом фильтрации. От величины последнего зависит скорость стекания воды с болота, изменение стока во времени, уровень режим грунтовых вод.

Роль инертного горизонта в стекании вод с естественных болотных массивов в подавляющем большинстве случаев ничтожна, и во многих

практических расчетах водного режима болот водопрпускную способность его полагают равной нулю /5/. Расход воды, фильтрующейся через инертный горизонт /1/, составляет менее 1% от расхода, пропускаемого деятельным горизонтом. В работе К.Е. Иванова /57/ показано, что сток в ручьях, вытекающих из болотных массивов, прекращается при падении уровней грунтовых вод в летний период ниже деятельного горизонта. Сток прекращается также в зимний период, если глубина промерзания достигает нижней границы деятельного слоя.

Толщина деятельного горизонта различна в разных болотных микроландшафтах и принимается равной расстоянию среднего многолетнего минимального уровня болотных вод от поверхности болота. По результатам наблюдений на болотных постах Гидрометслужбы и экспедиционных исследований ГГИ на исследованных болотных микроландшафтах зоны выпуклых олиготрофных болот толщина деятельного слоя изменяется от 16 до 54 см, а в зонах плоских евтрофных и мезотрофных болот и вогнутых евтрофных болот – от 24 до 95 см. При этом наибольшая толщина деятельного слоя залежи была получена на верховых болотах (табл. 3.9 в работе /11/) для группы мохово-лесных микроландшафтов, наименьшая толщина – для сфагново-осоково-проточных топей.

Водно-физические свойства деятельного слоя болот

Широкое изучение водно-физических свойств деятельного слоя торфяной залежи сибирских болот проводилось Западно-Сибирской экспедицией ГГИ. Целью этих исследований являлось определение для различных типов болотных микроландшафтов средних или расчетных значений капиллярной влагоемкости, водоотдачи и водопроводимости деятельного слоя торфяной залежи с изучением его строения /11/.

Водоотдача. Изменение запаса влаги в зоне аэрации торфяной залежи болотных массивов определяется величиной водоотдачи, зависящей от положения уровня болотных вод.

Под водоотдачей понимается способность полностью насыщенного водой грунта отдавать часть содержащейся в нем воды (свободной и связанной) под действием отрицательного гидростатического давления, вызванного снижением уровня грунтовых вод.

Процесс водоотдачи из болотных массивов происходит под действием ряда факторов и зависит в основном от структуры, пористости и размеров пор торфяного грунта, а также от его коллоидно-химических свойств, определяющих силы связи воды с органическим скелетом мохового оочеса и торфа.

Водоотдача деятельного слоя торфяной залежи, которому свойственны резкие изменения по глубине пористой структуры материала, является величиной переменной, зависящей от глубины залегания уровня болотных вод. Поэтому ее характеристикой служит кривая связи величины водоотдачи (в мм слоя) или послойных коэффициентов водоотдачи ξ_z с уровнем болотных вод (Z), $\xi_z = f(Z)$.

Результаты расчета осредненных характеристик водоотдачи деятельного слоя залежи в виде координат кривых $\xi_z = f(z)$ приведены для однородных и комплексных микроландшафтов в работе /11/.

Водопроницаемость. Численной характеристикой водопроницаемости служит коэффициент фильтрации, который получают экспериментальным путем.

Относительно широкие экспериментальные исследования фильтрационных свойств деятельного слоя торфяной залежи проведены экспедицией ГГИ в Западной Сибири в зоне олиготрофных болот на различных болотных ландшафтах /11/. При исследовании водопроницаемости коэффициенты фильтрации определялись в фильтрационном лотке на крупных монолитах торфа с ненарушенной структурой и непосредственно в торфяной залежи методом восстановления уровня воды в скважине после откачки /58, 59/.

Послойные коэффициенты фильтрации позволяют сравнивать водопроницаемость деятельного слоя торфяной залежи различных болотных микроландшафтов, расположенных на одном и том же болотном массиве, и однотипных микроландшафтов, расположенных на разных болотных массивах. Последнее особенно важно при решении вопросов, связанных с распространением полученных экспериментальных характеристик на неисследованные болотные массивы. Такое распространение возможно, потому что вариация коэффициентов фильтрации, которая зависит в основном от характера растительного покрова и микрорельефа, в однотипных микроландшафтах практически одинакова /11/.

Послойные коэффициенты фильтрации k_z для наиболее распространенных болотных микроландшафтов центральной и южной части Западно-Сибирской равнины, полученные на основании экспериментальных данных, а также расчетные значения среднего коэффициента фильтрации k_0 приведены в /11/.

Исследование зависимостей $k_z = f(z)$ для основных типов болотных микроландшафтов дало возможность получить необходимую физическую основу для гидрологических расчетов водного режима болот и горизонтального водообмена болот с окружающими территориями и водными объектами, а также выполнять необходимые обобщения в области гидрологии болот.

Водопроницаемость деятельного горизонта неосушенных болотных массивов в тысячи и десятки тысяч раз превышает коэффициенты фильтрации пластов торфа, составляющих инертный горизонт. Пределы изменения коэффициента фильтрации в деятельном горизонте от $a \cdot 10^{-2}$ до $a \cdot 10^2$, где a – положительное число от 1 до 10.

Для вычисления стока со всего болотного массива или с какой-либо его части, кроме фильтрационных характеристик, надо располагать данными по уровням болотных вод, а также типологической картой болотного массива и гидродинамической сеткой линий стекания фильтрационных вод, которые составляются по материалам аэрофотосъемки /39/.

Особенности процесса формирования стока на болотных массивах

Верховые болотные массивы, обладающие выпуклым рельефом, имеющие главным источником питания атмосферные воды, являются независимыми или мало зависимыми от морфологии речного водосбора географическими комплексами и представляют собой самостоятельные источники питания рек, будучи «первичными» преобразователями атмосферных вод, стекающих далее в речные долины и озерные котловины /5/.

Особенности формирования стока на болотных массивах и его внутригодовое распределение определяются различием в водопропускной способности деятельного и инертного горизонтов.

Вследствие малости значений коэффициентов фильтрации инертного горизонта последний в условиях естественных болотных массивов играет роль относительного водоупора, весьма своеобразного в том отношении, что в нем более 90% его объема составляет вода, связанная органическим веществом. Стеkanie воды с болотного массива, что подтверждается данными фактических наблюдений /5/, может продолжаться лишь до тех пор, пока не истощится запас свободной (несвязанной) воды в деятельном горизонте болота, т.е. пока уровни болотных вод находятся в пределах этого горизонта. Одновременные наблюдения над стоком и уровнем режимом, производившиеся на болотных гидрологических станциях, показывают, что сток с верховых массивов в летние и зимние периоды прекращается, как только соответственные уровни грунтовых вод в болотных микроландшафтах падают до нижней границы деятельного слоя и переходят в инертный горизонт /5/.

Неосушенные болота не могут сколько-нибудь значительно регулировать речной сток ввиду малых запасов влаги, заключенных в деятельном горизонте, и высоких значений коэффициентов фильтрации верхних слоев деятельного горизонта, обуславливающих быстрый сброс вод в периоды половодья и паводков. Объем воды в деятельном слое, участвующий во внутригодовом влагообороте, составляет в среднем не более 5% от общего объема воды, содержащегося в неосушенном болотном массиве /5/. Таким образом, если рассматривать болотный массив по отношению к его внешним водоприемникам как своего рода водоем, обладающий определенным запасом воды и регулирующий сток в ручьях и речках, вытекающих из него, то этот запас оказывается очень небольшим, равным количеству несвязанной воды, заключенной в деятельном слое болота. Остальное количество воды, представляющее осмотическую и капиллярную влагу в деятельном слое, и вся вода, заключенная в инертном горизонте, удерживается в болотном массиве и не участвует в питании ручьев и рек. Незначительность той части воды болота, которая участвует во внутригодовом влагообороте, можно проиллюстрировать следующим примером.

Возьмем болотный массив со средней толщиной торфяной залежи $T = 5$ м. Примем среднюю объемную влажность составляющих его торфов

$\eta = 95,5\%$ (весовая $\delta = 93\%$), среднюю толщину деятельного слоя $h = 0,5$ м, его объемную влажность $\eta_1 = 98\%$ и средний коэффициент водоотдачи деятельного слоя $\xi = 0,5$. Наибольшее количество воды, участвующее во внутригодовом влагообороте, составит

$$\frac{\xi h \eta_1}{h \eta_1 + (T - h) \eta} = \frac{0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,98}{0,5 \cdot 0,98 + (5 - 0,5) \cdot 0,955} = 0,051 \quad (1)$$

или 5% от общего количества воды, заключенного в болотном массиве /5/.

Отсюда видно, насколько мал тот объем воды в болотных массивах, который может оказывать регулирующее действие на сток во внешние водоприемники.

Таким образом, полное прекращение стока как в летний, так и в зимний периоды, наблюдаемое в действительности на ручьях с болотными водосборами, вполне согласуется с этим выводом.

Снижение уровней ниже деятельного горизонта, причиной которого является испарение, а не сток, обуславливает своеобразные условия для возобновления стока с болота в летний период после падения его до нуля. Очевидно, что сток будет оставаться равным нулю, пока средние интенсивности осадков и испарения будут в среднем одинаковы.

Для возобновления стока необходимо, чтобы интенсивность осадков значительно превышала интенсивность испарения в течение определенного промежутка времени, достаточного для подъема уровней грунтовых вод в пределы деятельного горизонта. Поэтому возобновление стока в летний период после падения его до нуля, как правило, происходит лишь при длительных систематических осадках и одновременном снижении испарения.

Таким образом, верховые болота, располагаясь в водосборах на наивысших отметках и составляя сами речные водоразделы, «трансформируют» лишь атмосферную влагу, выпадающую на их поверхность, представляя тем самым лишь определенную разновидность условий склонового стекания /5/.

На большей части болотного ландшафта в естественном состоянии сток осуществляется путем горизонтальной фильтрации по деятельному слою /1, 53, 54, 58, 60, 61/, поступая на границах в русла рек или в суходолы путем диффузии. Условия, влияющие на сток, отражены в гидроморфологических зависимостях, устанавливающих общие связи между формой потока в плане, фильтрационной способностью деятельного горизонта различных болотных микроландшафтов, формой рельефа поверхности болота и его питанием /5, 62/.

Основное дифференциальное уравнение гидроморфологических зависимостей (2) связывает рельеф болотного массива dy/dS вдоль любой произвольно выбранной линии стекания S с типами болотных микроландшафтов, характеризующихся средним модулем проточности $\overline{Ms}$, плановой фор-

мой фильтрационного потока (b_0 и b_s) и интенсивностью внешнего $\bar{g}_0$ и внутреннего $\bar{P}_s$ питания болота.

$$dy/dS = (\bar{g}_0 b_0 + \int_0^S \bar{P}_s b_s ds) / \bar{M} b_s \quad (2)$$

Установлено [6, 62, 63], что сток с болотных систем зависит от водного баланса, определяемого климатическими и гидрогеологическими условиями залегания болота, закономерностями распространения растительного покрова по болоту, стадией развития болотного массива, рельефом его поверхности или плановой формой фильтрационного потока и гидрофизическими свойствами деятельного горизонта.

В климатической зоне избыточного увлажнения, где болотообразовательный процесс проявляется в полной мере, с изолированных простых болотных массивов сток осуществляется преимущественно путем фильтрации в деятельном горизонте вдоль линий стекания, преобразуясь в русловой сток в основном только на окрайках. Максимальные размеры простых болотных массивов, при которых наблюдается фильтрационный сток без внутриболотной речной сети (временная и постоянная), полученные по АФС, по данным Т.С. Савельевой [56], составляют от 3,1 до 5,7 км². При этом в большинстве случаев на склонах наблюдаются проточные топи.

Особенности склонового стекания влаги по территории болотного массива [5] заключаются в следующем:

1. Стеkanie влаги происходит рассредоточенным по территории болотного массива фильтрационным потоком. Основное количество воды фильтруется в относительно тонком поверхностном слое, составляющем деятельный горизонт торфяной залежи. В целом же горизонтальная фильтрация в толще всей залежи является функцией распределения коэффициентов фильтрации по глубине и уклонов свободной поверхности воды по территории болотного массива. В тех болотных микроландшафтах, в которых периодически наблюдается поверхностное движение воды, последнее представляет собою поток, покрывающий поверхность болота также сплошным тонким слоем, толщиной обычно не свыше 20–25 см, а в большинстве случаев гораздо меньше.

2. В торфяной залежи не может быть двух различных зон: зоны поверхностного стекания и зоны грунтового болотного потока. Уровень болотных вод на болотах, который периодически поднимается до поверхности болота и даже выше ее, фиксирует в то же время и верхнюю границу того единственного слоя воды, который принимает участие в склоновом стекании.

3. Верхний горизонт деятельного слоя, обладая чрезвычайно большими коэффициентами фильтрации и, соответственно, крупными порами,

беспрепятственно пропускает выпадающие на поверхность болота осадки, которые в этом случае фильтруются с большой скоростью до уровня грунтовых вод. Скорость вертикальной фильтрации осадков, в соответствии с данными о величине коэффициентов фильтрации, составляет в деятельном горизонте в среднем от 1 до 10 см/сек., т.е. для расчетов стока время инфильтрации до уровня болотных вод настолько мало, что может приниматься равным нулю.

4. Уклоны поверхности грунтовых болотных вод на неосушенных болотах практически всегда равны уклонам поверхности болотного массива. Последнее обстоятельство является особенностью болот /1/, позволяя рассматривать горизонтالي поверхности болотного массива как линии равных напоров и строить на основании этого расчетные сетки линий стекания. Равенство уклонов поверхности болотных вод уклонам поверхности болотного массива в каждом данном микроландшафте является следствием постоянной близости уровней болотных вод к поверхности болота, небольшой амплитуды колебаний их и почти полной синхронности колебаний в различных частях болотного массива /11/.

Поток болотных вод, фильтрующий через инертный и деятельный горизонты торфяной залежи, а также поверхностный поток в период, когда уровень стоит выше поверхности болота, представляют собой сплошной непрерывный поток, в каждой точке которого гидростатические давления определяются отметками свободной поверхности воды. Поэтому разности давлений, под действием которых фильтруется вода на том или другом участке болотного массива, могут быть приняты равными разностям отметок поверхности болота /5/.

В соответствии с этим для построения сеток линий стекания, являющихся основой при расчетах стока с болотных массивов методом склонового стекания, необходимо, очевидно, иметь карты болотных массивов с нанесенными горизонталями их поверхности. Проводя линии, ортогональные к горизонталям поверхности массива, получим сетку линий стекания, определяющую в каждой данной точке болотного массива направление скоростей горизонтальной фильтрации по всей толще торфяной залежи и скоростей поверхностного стекания. Сетка линий стекания на болотных массивах характеризует, таким образом, не фиктивный поток, а реальный фильтрационный поток гравитационной воды, заключенной в толще массива, и поверхностный поток в периоды высокого стояния уровней /5/.

В зимний период деятельный горизонт над уровнем грунтовых вод сохраняет большую пористость, благодаря чему во время весеннего снеготаяния талые воды также свободно проникают до уровня грунтовых вод и далее движутся общим фильтрационным потоком в направлении уклона поверхности болота. Этим, в частности, объясняется то обстоятельство, что в периоды весеннего снеготаяния на выпуклых моховых болотных массивах, как правило, не наблюдается поверхностного склонового стока поверх мерзлого слоя. Поэтому условия склонового стекания на таких бо-

лотных массивах в весенний период не отличаются или отличаются незначительно от условий стекания в теплые периоды года при отсутствии мерзлоты /5/.

При глубоком промерзании, когда мерзлый слой захватывает зону грунтовых болотных вод, а также на микроландшафтах с высоким стоянием уровней болотных вод промерзший слой в нижней части представляет сплошной монолит без пор, что создает в период весеннего снеготаяния условия стекания, отличные от условий при талом состоянии болота. В таких случаях в весенний период, наряду с фильтрационным движением в мерзлом пористом поверхностном слое, может наблюдаться и поверхностное стекание /5/. Анализ уровенных данных, приведенной в /11/ показывает, что поверхностный сток на верховых болотах Западной Сибири практически не наблюдается, только в сфагново-шейхцериево-осоковом микроландшафте (топи) уровень 1%-ной обеспеченности достигает средней поверхности болота. Однако непосредственные наблюдения показывают, что в отдельные годы, при дружной весне и глубоком промерзании залежи, часть стока с болотных массивов проходит по замерзшей поверхности болота. Такой сток характерен преимущественно для необлесенных микроландшафтов. Следует отметить, что продолжительность стока по замерзшему слою залежи весьма невелика (не более нескольких дней в году) /11/.

1.4. Уровенный режим в зоне выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот

Положение уровня воды относительно поверхности болот является одной из главных характеристик обводненности болот. Располагая данными о режиме колебания уровней болотных вод и используя известные в настоящее время связи уровней с водно-физическими характеристиками деятельного слоя (водоотдача, водопроницаемость, влажность и др.), можно производить расчеты водообмена и водного баланса болот.

Внутригодовой ход уровней имеет общую закономерность, свойственную всем типам болотных массивов и их отдельным микроландшафтам: повышение уровней весной в период таяния снега, последующее постепенное их снижение после весеннего максимума, летний минимум, приходящийся на вторую половину августа, осеннее повышение уровней, наблюдающееся большей частью в начале сентября и конце октября, зимнее незначительное снижение уровня, продолжающееся до начала снеготаяния, или стабильное его стояние в течение зимнего периода. Колебания уровня в различных болотных микроландшафтах синхронны, различны только их амплитуды.

Весенний подъем уровня в Обь-Иртышском районе начинается в первой половине апреля – начале мая, практически с момента перехода температуры воздуха через 0°C, т.е. начала снеготаяния. Продолжительность

подъема половодья в разные годы различна и зависит от дружности весны. Величина подъема уровня в весенний период в различных микроландшафтах неодинаковая: наибольшая – в мохово-лесных и мохово-кустарничковых, облесенных сосной микроландшафтах, где она достигает 80 см, наименьшая – в топях и на мочажинах грядово-мочажинных комплексов (10–15 см). Последнее объясняется различием в величинах коэффициентов водоотдачи деятельного слоя в этих микроландшафтах, а также относительно высоким стоянием уровней в зимний период в грядово-мочажинном и грядово-озерковом комплексах.

Несмотря на относительно большую величину весеннего подъема уровней в микроландшафтах лесной и мохово-лесной групп, а также на грядах комплексных микроландшафтов уровни редко выходят на поверхность, покрывая водой лишь наиболее низкие межкочечные понижения. В моховых и мохово-травяных микроландшафтах, а также в мочажинах комплексных микроландшафтов в весенний период вода иногда стоит выше поверхности болота.

В летний период наблюдается общий спад уровней, обусловленный стоком и испарением с болот. Плавность хода уровней нарушается отдельными подъемами, вызванными выпадающими осадками.

В осенний период в отдельные годы происходит небольшое повышение уровня, которое обусловлено уменьшением испарения и некоторым увеличением осадков. Со второй половины октября в связи с понижением температуры воздуха и прекращением атмосферного питания в сфагново-кустарничково-сосновом и сфагново-кустарничковом облесенном сосной микроландшафтах начинается плавный спад уровней, который продолжается в течение всего зимнего периода, до начала весеннего снеготаяния, в то время как в грядово-мочажинном и грядово-озерковом комплексах обычно падение уровня происходит лишь до момента промерзания деятельного слоя мочажин или совсем не наблюдается /11/.

Синхронность колебания уровней в различных частях болотного массива, являющаяся следствием высокого стояния их и условий фильтрационного стока через деятельный горизонт болот, обуславливает достаточно тесную связь между соответственными уровнями в различных микроландшафтах. Коэффициент корреляции такого типа связей колеблется в пределах 0,80–0,94 /11/.

В /11/ приводятся значения соответственных уровней воды для различных типов болотных микроландшафтов зоны выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот, которые по данным наблюдений или расчета уровня в каком-либо одном микроландшафте позволяют получить значения уровней в других микроландшафтах конкретного болотного массива. Также в монографии приведены кривые обеспеченности средних, максимальных и минимальных уровней за теплый период года сфагново-кустарничкового, облесенного сосной микроландшафта. По этим кривым с помощью таблицы соответственных уровней определены уровни различной обеспеченности в других, наиболее распространенных микроландшафтах.

1.5. Водосборы внутриболотной гидрографической сети

Согласно принятой в гидрологии болот терминологии, внутриболотными называют такие водосборы, большая часть площади которых занята болотными ландшафтами и водоразделы которых с соседними водосборами проходят внутри границ болотных систем. Сток во внутриболотную гидрографическую сеть и во внешние водоприемники при этом определяется интенсивностью поступления влаги на болотный массив и условиями стока в пределах водосбора.

В свою очередь, к внутриболотным рекам отнесены реки, находящиеся в пределах болотных ландшафтов и протекающие в руслах, залегающих непосредственно в торфяной залежи, или отделяющиеся от последней узкими, шириной не более 200 м, полосами минеральных земель /11/. Эти реки, являющиеся неотъемлемым элементом болотных макроландшафтов и их гидрографической сети, в значительной мере определяют степень естественного дренирования болот и заболоченных земель /11/. Сеть этих рек рассматривается как самостоятельное естественно-историческое образование, неразрывно связанное и взаимодействующее с болотной системой. Она представляет собой, как и любая речная система /11, 51, 52, 64–67/, пространственно связанную, закономерную совокупность водотоков разных типов и порядков.

Процесс развития болотных систем в зоне избыточного увлажнения, по Е.А. Галкиной /4, 9/, К.Е. Иванову /5, 6/, Е. А. Романовой /38/, определяет /62/ характер формирования в их пределах гидрографической сети, являющейся составной частью этих систем.

Таким образом, речная сеть на болотах функционирует и развивается в результате взаимодействия процессов болотообразования и саморазвития болотных систем, а также возмущающих климатических воздействий и процессов саморегулирования. За счет отвода избытков влаги за пределы болотной системы она обеспечивает стабильность болотных систем в определенном диапазоне изменения их свойств.

Поскольку рост и развитие растительности на практически однородном торфяном субстрате при бедном атмосферном питании определяется преимущественно интенсивностью обменных процессов /6/, то растительной покров и его изменение в пространстве может быть хорошим индикатором интенсивности стоковых процессов водосбора. Поэтому изменение интенсивности стока в пределах водосбора обуславливает и соответствующую структуру поверхности водосбора как целостной геосистемы.

По определению ряда авторов /64, 65, 68/, речной водосбор рассматривается как геосистема с односторонним потоком вещества и энергии, а главное, с постоянством этого процесса в многолетнем плане. Геосистема – основная категория ландшафтоведения, динамическая материальная система, состоящая из географических компонентов, взаимосвязанных и взаи-

мообусловленных в своем развитии и пространственном размещении /69/. Способ существования геосистем есть функционирование, т.е. сохранение своей целостности, определенности и своей выделенности из окружающей среды через непрерывное изменение состояния системы в целом и отдельных ее частей и элементов. Вместе с развитием во времени и ростом по площади болотной системы формируется механизм ее саморегулирования, за счет чего поддерживаются устойчивыми характеристики водного режима и гидрофизических параметров торфяной залежи в каких-то определенных пределах изменения внешних для болотной системы многолетних, сезонных, годовых или суточных условий: осадков, прихода и расхода тепла и т.п. Болотная растительность приспосабливается к интенсивности водообмена, обеспечивающего подвод питательных веществ к корневой системе и отвод продуктов их метаболизма в каждой точке водосбора. Механизм саморегулирования водообмена благодаря адаптивным свойствам болотной растительности отображается на КС и АФС в строго определенном взаиморасположении растительных сообществ относительно направлений стекания болотных вод и речной сети.

В пределах территории болотных макрорландшафтов выделяются внутриболотные водосборы и области диффузного стока. Внутриболотные водосборы дешифрируются и определяются по снимкам, поскольку сетка линий стекания позволяет достоверно выделить их из болотной системы. Движение влаги на водосборе в гидрографическую сеть происходит в результате регулярного воспроизводства водных ресурсов за счет выпадающих осадков и внешнего питания грунтовыми и приточными водами. Для того чтобы водосбор как система мог функционировать, вода должна прокладывать себе путь только по таким траекториям, которые обеспечивают наименьшую затрату энергии при стоке воды, и должен существовать градиент /70/, в нашем случае градиент напора, создающийся рельефом водосбора.

По мнению Т.С. Савельевой /56/, внутриболотный водосбор является открытой системой, так как в нем идет непрерывный обмен веществом и энергией с окружающей средой, при этом сток – процесс необратимый. Основным же структурообразующим фактором водосбора является однонаправленность потоков вещества и энергии.

Определение структуры водосборов и ее анализ позволяют глубже понять процессы формирования и регулирования стока с болотных систем. Следовательно, структура водосбора неразрывно связана с условиями формирования стока.

Структура внутриболотных водосборов

Гидрологическая структура внутриболотного водосбора формируется главным образом под воздействием однонаправленности потоков вещества и энергии с водосбора к дренирующему его водотоку, действующих на водосбор с разной скоростью, но постоянно и независимо от природных ритмов. Вода, стекающая с болотной системы в открытые водотоки, влия-

ет на формирование структуры поверхности через горизонтальную проточность, скорость и интенсивность которой определяют особенности структуры растительного покрова, поступление питательных веществ к корневой системе растительности, вынос продуктов метаболизма (скорость, объем, распределение в пространстве в зависимости от пространственной плотности потока стекающей влаги, периоды воздействия и их длительность и т.д.). Интенсивность этого потока в направлении от водоразделов до русла в целом различна и возрастает по мере приближения к руслу /56/.

Структура внутриболотных водосборов представляет собой сложившиеся устойчивые связи в массо- и теплообмене между его элементами, отражающиеся во взаимном расположении этих взаимодействующих элементов в пространстве, т.е. на площади водосбора /71/. Как уже упоминалось выше, исходя из общих физических представлений о движении влаги в болотных системах, выделяются следующие наименьшие структурные элементы во внутриболотных водосборах: водотоки, топи, сточные и проточные озера, непроточные озера, суходольные острова и группы болотных микроландшафтов – лесные, мохово-лесные, моховые, мохово-травяные и травяные и комплексные. Растительность этих групп микроландшафтов и топей может быть (в зависимости от водно-физических условий и трофности среды) олиготрофной, мезотрофной, евтрофной и микстотрофной.

При изучении взаимного положения элементов на водосборах Т.С. Савельевой /56/ было выявлено, что они различаются не абсолютными размерами площадей выделенных элементов и шагом их чередования на каких-либо участках, а положением однотипных элементов по отношению к гидрографической сети и взаиморасположением по отношению к сетке линий стекания в целом по водосбору. Отмечено, что даже в относительно небольших речных водосборах условия стока могут быть разными из-за различия устройства их поверхности /72, 73/.

Применительно к рассматриваемому в данной работе болотному району внутриболотные водосборы характеризуются тем, что при более или менее однородных микроландшафтах, развивающихся на водосборе, истоки водотоков начинаются из топей разных типов: фильтрационных, проточных и транзитных. Часто переход топи в русло происходит почти у выхода реки из болота в суходольную часть. В пределах болотных массивов при слабом развитии речной сети сток в основном осуществляется по обширным фильтрационным, грядово-озерковым и проточным топиям, которые встречаются на склонах болотных массивов и на стыке мезоландшафтов. Топи могут занимать значительные территории на водосборах (до 35% площади водосборов, в среднем 15–18%). Встречаются внутриболотные водосборы с неразветвленными топиями в истоках водотоков, которые могут иметь линейную или веерообразно сходящуюся форму, и водосборы с разветвленными топиями в истоке русловой сети.

Поскольку внутриболотный водосбор есть пространственная физико-географическая система, то основной целью при изучении его структуры является выявление закономерностей дифференциации его поверхности и характера взаиморасположения элементов на его территории по рисунку изображения на снимках. Структура водосборов изучается по разномасштабным АФС и КС, подход к дешифрированию которых рассматривается далее.

При этом строение поверхности водосборов хорошо отражается на АФС благодаря индикационным свойствам болотной растительности /38, 61/, а также общей ландшафтной структуре болотных систем /6/.

Пространственная неоднородность водосборов по интенсивности процессов водообмена и аэрации деятельного горизонта отражается в разделении его площади на разные по составу и структуре растительного покрова области, играющие соответственно различную роль в процессах формирования руслового стока с болотных систем.

Каждый уровень структуры характерен не повторяющейся в других уровнях качественной определенностью и генезисом внутренних элементов. Так, тип ландшафта, в котором располагается водосбор, является наиболее генерализованным по изображению на снимках пространственным регулятором стока. Он диагностируется по геологически однородному фундаменту и взаиморасположению ландшафтных единиц меньшего ранга: урочищ и фаций.

При таком понимании структуры речного водосбора внутренняя его организация как единой пространственной воднобалансовой системы находит отражение в строении его поверхности, а закономерности расположения структурных элементов по территории представляют одну из форм отображения условий формирования стока. Поэтому изучение пространственных закономерностей в строении водосборов может дать достоверную основу для исследования процессов формирования стока и его регулирования в различных ландшафтных условиях и на различных участках речных систем. Она представляет собой картографическое отображение стокоформирующей активности водосбора и является дистанционным индикатором стока /56/.

Следовательно, структура водосбора и его изображение на снимках являются основой при анализе особенностей формирования речного стока с болотных ландшафтов. Структурирование является доминирующим при практическом изучении и составлении моделей функционирования многих природных систем /74/.

В современных условиях наиболее совершенным и объективным способом исследования пространственных структур географических объектов является, как известно, использование аэрокосмической информации и методов дешифрирования снимков /75/.

1.6. Применение аэрокосмических снимков в исследованиях болотных массивов

К дистанционному зондированию (ДЗ) относятся методы получения информации о строении наземных объектов и геосистем без непосредственного контакта наблюдателя с ними.

По-настоящему широкие перспективы открылись перед ДЗ только с развитием компьютерных технологий /76–79/, переносом всех основных операций по обработке и использованию данных съемок на персональные компьютеры, особенно в связи с появлением и широким распространением геоинформационных систем (ГИС).

В настоящее время отмечается интенсивное развитие методов дистанционного зондирования окружающей среды. Они применяются для широкого спектра исследовательских, картографических и мониторинговых задач /80–85/. Получаемые в результате ДЗ аэрокосмические снимки важны здесь в двух формах применения: как источник оперативной и современной информации и как основа для создания тематической карты. Раньше система мониторинга, проводимая наземными службами, не всегда укладывалась в сроки проводимых обновлений и страдала от пространственных неточностей и недосмотров. Сегодня эта проблема однозначно снимается при наличии данных дистанционного зондирования (ДДЗ), которые практически этот вопрос решают утвердительно, с высокой степенью точности и объективной достоверности /86–88/. ДДЗ на сегодняшнее время являются важнейшими источниками информации о природной среде для тематических слоев в ГИС, для поддержания данных ГИС в актуальном состоянии, а ГИС-технологии способствуют максимально эффективному совместному использованию разных типов информации – оперативной аэрокосмической, наземной, картографической.

Основные положения, связанные с понятиями аэрокосмических методов исследования – ДЗ, многозональные космические снимки, их типы и методы использования изложены в многочисленных работах /89–95/.

Дешифрирование снимков как метод исследования территорий по аэрокосмическому изображению основано на зависимости между свойствами объектов и характером их воспроизведения на снимках.

Независимо от задачи, стоящей перед исследователем, процесс обработки изображений включает в себя следующие технологические стадии:

- 1) выбор и подготовка изображений;
- 2) дешифрирование;
- 3) обработка и интерпретация результатов, а также определение качественных и количественных характеристик объектов и представление результатов дешифрирования в картографической, цифровой или текстовой форме.

Методы извлечения (дешифрирования) информации при всем их многообразии сводятся к двум основным:

1) визуальному при работе как с фотоматериалами, так и с изображением на экране монитора цифровых снимков;

2) автоматизированному, осуществляемому преимущественно на персональных компьютерах с использованием специализированного программного обеспечения, реже на специально предназначенных для этого приборах.

В первом случае информацию извлекает дешифровщик путем визуального анализа как фотоматериалов, так и путем визуального анализа экранного изображения. Исполнитель в отличие от компьютера воспринимает прежде всего пространственную информацию, часто даже не зная количественных характеристик. Яркостные различия оцениваются на качественном уровне, но зато учитываются косвенные дешифровочные признаки.

Второй подход заключается в выполнении математических процедур, позволяющих сгруппировать объекты по некоторому формализованному признаку. В настоящее время в качестве признака используют на черно-белых снимках – величину яркости, а на многозональных – набор значений яркости на серии зональных снимков, называемый спектральным образом. Анализ ведется на уровне отдельного пикселя. Пространственную информацию о дешифрируемых объектах при этом подходе обычно получают с использованием программных средств путем подсчета пикселей с близкими или одинаковыми характеристиками.

Основным преимуществом первого подхода является легкость получения пространственной информации и привлечение комплекса дешифровочных признаков, позволяющих принимать решения на высоком уровне. Преимуществом второго подхода является возможность выполнения сложных математических преобразований при малом участии человека. Очевидно, что оба подхода могут дополнять один другого, а потому часто используются совместно.

Основные принципы и способы визуального дешифрирования сохраняются вне зависимости от того, представлены снимки как изображение на фотобумаге (пленке) или на экране. Различие заключается в том, что во втором случае дешифровщик имеет дело со снимком, свойства которого он может изменить, а в первом такой возможности нет.

Изучение природного многообразия микроландшафтов болотных массивов стало возможным в значительной степени благодаря развитию аэрокосмических методов и ландшафтно-генетическим исследованиям болотных массивов с использованием материалов АФС, КС и полевых наблюдений /6, 96/. Разрешение большей части современных КС (в десятки метров) соответствуют размерности большинства исследуемых географами объектов земной поверхности. Это делает снимки ценным материалом для тематического картографирования.

В исследованиях болотных ландшафтов применяются снимки земной поверхности в основном в видимой и инфракрасной (ИК) области спектра электромагнитного излучения, выполненные с разных высот и различной

аппаратурой с заранее известными параметрами, которые влияют на изображение /97–99/.

Устойчивая структура болотных массивов формируется как результат действия процессов, протекающих в деятельном слое болота, и хорошо отражается на снимках благодаря индикационным свойствам болотных микро- и мезоландшафтов в изменении структуры изображения, текстуры в пределах однородных контуров и фототона.

Индикационными свойствами растительного покрова являются известные связи между характеристиками растительного покрова, особенностями его территориального распределения и соответствующими параметрами среды обитания /6/. Это обусловлено генезисом болотных массивов /4/ и гидрологическими процессами, протекающими в них, а именно интенсивностью горизонтального и вертикального водообмена, амплитудой колебания уровня болотных вод, тепловым режимом, длительностью стояния определенного уровня воды на какой-либо глубине от поверхности болота в деятельном горизонте торфяной залежи, проточностью болотных вод вдоль линий их стекания /55, 100–102/.

Индикаторные свойства пространственной ландшафтно-гидрологической структуры болотных массивов на аэрокосмических снимках воспроизводятся всегда в какой-то мере обобщенными, т.е. создается фотографическая модель разного масштаба. Сравнительный анализ разномасштабных снимков одних и тех же болотных массивов показывает, что контрастность тона и структурных характеристик изображения элементов являются прямыми дешифровочными признаками на снимках любого масштаба. С уменьшением масштаба съемки возрастает роль вспомогательных или косвенных признаков, основанных на знании закономерностей функционирования системы, логических индикаторов.

На мелкомасштабных КС в процессе разной генерализации – спектральной, геометрической и особенно тематической /98, 99, 103/ – мелкие детали растительного и почвенного покровов, открытых водных поверхностей, форм рельефа, мест с различными условиями увлажнения сливаются в более крупные. Процесс генерализации изображения приводит к выявлению на снимках общих пространственных закономерностей, отражающихся на изменении тона, текстуры изображения, значений их спектральной яркости. Поэтому совместный анализ материалов съемок одних и тех же участков разного масштаба дает большие преимущества при дешифрировании болотных массивов как на элементарном и зональном уровнях, так и на высшем уровне. Изучение крупных болотных массивов по КС позволяет увидеть наиболее крупные структурные особенности их строения, ускользающие из поля зрения при анализе материалов крупномасштабной аэрофотосъемки из-за недостаточной генерализации изображения.

Границы различающихся по условиям стока зон наводятся по линиям перепада уровней яркости на снимках в разных областях спектра, по контрастам текстуры однотипного участка, скачкам в размерах элементов

изображения, разрывам в характере их чередования, на местах встречи ландшафтов с разной ориентированностью элементов рисунка.

В настоящее время использование аэрокосмических снимков болотных массивов дает значительные преимущества, а именно:

1) дешифрирование ДДЗ позволяет камеральным путем получить не только общее представление о болоте, но и установить его тип и ряд особенностей еще до наземного изучения болота. Особенно это актуально для труднодоступных заболоченных территорий Западной Сибири;

2) ДДЗ обладают необходимой объективностью и документальностью информации. Также следует отметить большую наглядность АФС и КС болот и отсутствие схематизации, которая присуща любой карте.

3) АФС и КС (сверх высокого разрешения) болот отличаются исключительной точностью, детальностью, полнотой ситуации и изображения природных особенностей поверхности болота. Они прекрасно отображают не только характер поверхности и растительный покров болота, но и его обводненность, и внутреннюю гидрографическую сеть, а также связь болота с внешними водоприемниками.

1.6.1. Виды и методики визуального дешифрирования аэрокосмических снимков

Важный методологический подход при географическом дешифрировании – анализ дешифрируемых объектов в развитии. При визуальном дешифрировании исполнитель распознает объекты на аэрокосмическом снимке, определяет их качественные и некоторые количественные характеристики, выявляет взаимосвязи между объектами, явлениями и процессами, а также закрепляет результаты дешифрирования в графическом виде. Однако при целевом дешифрировании исполнитель обычно сталкивается как с избыточной информацией, присутствующей на снимке, так и с недостатком необходимой информации. Это требует глубоких профессиональных знаний и навыков исполнителя о предмете исследования и методов дешифрирования аэрокосмических снимков для извлечения полной и достоверной информации.

До настоящего времени визуальное дешифрирование остается основным и наиболее распространенным способом извлечения информации из снимков. При визуальном дешифрировании изучаемый локальный объект или явление всегда рассматривается в пространственной взаимосвязи с его окружением, что дает важную, нередко решающую дополнительную информацию, которая обычно ускользает при компьютерной обработке. Поэтому стратегия совершенствования способов получения тематической информации по аэрокосмическим снимкам заключается в интеграции визуального и компьютерного дешифрирования, каждое из которых имеет свои достоинства и ограничения. Так, визуальное дешифрирование снимков на экране компьютера с успехом дополняется автоматизированной

обработкой по специальным программам, позволяющим улучшить дешифровочные свойства снимка, либо быстро и с большой детальностью выделить четко изобразившиеся объекты. Для разделения объектов различного типа, определения границ между ними используются методы компьютерной классификации (кластеризации). Однако для определения достоверности результатов компьютерной обработки снимков нередко используется визуальная оценка снимков.

Технология и организация работ по дешифрированию существенно зависят от его задач, территории, масштаба и вида снимков. Существуют различные организационно-технологические схемы дешифрирования, но все они включают следующие этапы /104/:

- 1) изучение методических рекомендаций по данному виду дешифрирования, ознакомление с литературными и картографическими материалами по объекту и району исследований;

- 2) выявление набора объектов дешифрирования (составление предварительной легенды будущей схемы дешифрирования или карты);

- 3) подбор снимков для дешифрирования, преобразование снимков для повышения выразительности изучаемых объектов, подготовка приборов и вспомогательных средств дешифрирования;

- 4) дешифрирование аэрокосмических снимков и оценка достоверности дешифрирования;

- 5) оформление результатов дешифрирования.

Центральным моментом любых работ является собственно дешифрирование аэрокосмических снимков. Работая со снимками, особенно с космическими, дешифровщик широко привлекает дополнительный материал, обычно картографический, который служит для уточнения дешифровочных признаков и оценки результатов дешифрирования.

Тематическое дешифрирование выполняется по двум принципиальным логическим схемам. Первая схема предусматривает вначале распознавание объектов, а затем их графическое выделение. Вторая схема предусматривает вначале графическое выделение на снимке участков с однотипным изображением, а затем их распознавание. Обе схемы завершаются этапом интерпретации, научного толкования результатов дешифрирования.

Первая схема оказывается универсальной для решения большинства задач и получила широкое признание в практике визуального дешифрирования. Вторая схема весьма эффективна при дешифрировании относительно простых объектов по яркостным признакам, но имеет ограниченное применение. Обе эти схемы при компьютерном дешифрировании реализуются в технологиях классификации с обучением и без обучения /104/.

Признаки, по которым распознаются объекты на снимках, называются дешифровочными. Они были сформулированы применительно к визуальному дешифрированию АФС, но большинство из них сохраняет значение как при работе с космическими фотографическими снимками, так и при визуальном дешифрировании цифровых снимков на экране монитора. Дешифровочные признаки принято делить на прямые и косвенные.

Свойства объекта, находящие непосредственное отображение на снимках, принято называть прямыми дешифровочными признаками. К ним относят три группы признаков:

- 1) геометрические (форма, тень, размер);
- 2) яркостные (фототон, уровень яркости, цвет, спектральный образ);
- 3) структурные (текстура, структура, рисунок).

Прямые дешифровочные признаки позволяют распознать объекты, изображенные на снимке, однако по ним не всегда удастся интерпретировать их, т.е. определить их свойства. Для этого используются косвенные дешифровочные признаки. Методологической основой дешифрирования по косвенным признакам служит наличие взаимосвязей и взаимообусловленности всех природных и антропогенных свойств территории. В качестве косвенных обычно выступают прямые дешифровочные признаки других объектов.

В целях гидрологического дешифрирования болот искомые объекты могут быть разделены на две группы: площадные (болотные микроландшафты) и линейные (линии стекания болотных вод). Автоматическое распознавание площадных объектов (болотные микроландшафты) в настоящее время вполне реализовано. А вот задача автоматического распознавания линий стекания по изображению не решена, т.е. для дешифрирования сеток линий стекания метод прямого распознавания образов неприменим. Для решения этой задачи требуется опытный исполнитель, владеющий приемами составления сеток линий стекания на болотных массивах. Поэтому современный технологический подход к реализации дешифрирования болот может базироваться на сочетании экспертных и автоматизированных методов оценки информации.

Исходя из этого для гидрологического дешифрирования болотных массивов по-прежнему весьма актуальны традиционные методики визуального дешифрирования, которые на сегодняшний день, пожалуй, обеспечивают наиболее полный анализ информации, скрытой в изображении. Однако, как и в любом экспертном методе, высок субъективизм полученных результатов, и их качество, как уже упоминалось выше, сильно зависит от опыта дешифровщика. Исследователю приходится вначале определять ландшафтные индикаторы изучаемых процессов, отыскивать их образы на изображении и таким образом идентифицировать искомый процесс. В настоящее время процесс дешифрирования болот сводится к следующим этапам:

- 1) установление взаимосвязей между ландшафтами и гидрологическими процессами на исследуемой территории и определение ландшафтных индикаторов искомых гидрологических объектов (т.е. признаков проявления этих объектов в изображении ландшафта);
- 2) выделение на изображении фототона и их ландшафтной интерпретации;
- 3) построение сеток линий стекания и выделение отдельных болотных структур на основе установленных закономерностей.

1.6.1.1. Методика визуального дешифрирования аэрофотоснимков

К настоящему времени разработанные методы визуального дешифрирования АФС получили достаточное теоретическое обоснование в болотоведении /1, 4, 5, 38, 96, 105 и др./ и обеспечивают надежные результаты при практическом дешифрировании. В области гидрологического дешифрирования болот основными методическими руководствами до сего времени являются монография «Основы гидрографического дешифрирования аэрофотоснимков» /105/, «Методические указания по расчетам стока с верховых болот» /106/, «Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 8» /59/, а также общие монографии о болотах /1, 5/. С развитием теории болотных систем и накоплением новых данных по аэроназемным исследованиям болот позволило Т.С. Савельевой в своей монографии /56/ провести дальнейшее уточнение и дополнение дешифровочных признаков.

К числу прямых дешифровочных признаков на АФС относятся: зернистость, полосатость рисунка, различная тональность отдельных участков, а также минеральные острова на болотах. Зернистость рисунка АФС свидетельствует об облесенности местности. При этом изображение лесов на суходолах характеризуется значительно более крупной и разнообразной зернистостью рисунка, чем лесов на болотах, поэтому лесные и облесенные болота сравнительно легко распознаются на АФС.

Характерный полосатый рисунок АФС отражает развитый микрорельеф болота, чередование гряд и мочажин или гряд и озерков. Так как взаимное расположение элементов микрорельефа и растительных комплексов на болотах бывает различным, то соответственно этому бывает различным и характер полосатости рисунка АФС. Различная тональность АФС отражает собою различную обводненность отдельных участков болота.

Хорошими прямыми дешифровочными признаками болот на АФС являются водоемы и водотоки. Они нередко многочисленны, и размеры их варьируют от крупных до мельчайших. Вместе с этим водоемы и водотоки легко распознаются по гладкому темному или черному тону рисунка и по своей форме: округлой – у водоемов и вытянутой, извилисто-нитевидной – у водотоков. Резко выделяются на АФС болот минеральные острова, которые, как правило, облесены, и рисунок их отличается крупной и более четкой зернистостью.

В качестве косвенных дешифровочных признаков болот используются определенные закономерности распределения растительного покрова (изменения изображения поверхности) на болоте при изменении водного режима болотного массива, взаимное расположение озер и водотоков, расположение микроландшафтов болотных массивов относительно водоприемников. Так, например, на травяных низинных болотах, находящихся на ранних стадиях развития, водоприемники часто расположены посреди болот. Моховые, выпуклой формы болота имеют водоприемники на окрайках болот. В случае же расположения водоприемников в средней части

крупных болот мохового типа они указывают на болотную систему, которая образовалась в результате соединения нескольких болотных массивов.

В целях гидрологического изучения болот дешифрирование снимков начинается с построения сеток линий стекания, дающих наглядное представление о структуре болота, о степени развития внутриболотных водосборов. Принципы и характеристики основных признаков, позволяющие на АФС в любой точке массива определять направление фильтрационного или поверхностного потока воды, изложены в статье К.Е. Иванова /107/ и в его монографии /6/. Признаки проведения линий стекания приведены также в работах /5, 59, 96, 106 и др./.

Признаки для составления сетки линий стекания следуют из анализа гидробиологических свойств болотных массивов и условий их залегания в рельефе. Физическое обоснование их приведено в работе /6/.

Основные общие направления сетки линий стекания определяются по геоморфологическим условиям залегания болотных массивов независимо от их типа /5/. Так, например, с болот водораздельного плакорного залегания воды стекают в различных направлениях, часто поступая в разные речные бассейны.

На водораздельно-склоновых болотах воды могут стекать в зависимости от рельефа и положения массива либо в направлении общего склона в водоприемник, либо в направлении склона к главной реке и ее притокам, по отношению к которым массив занимает водораздельное положение.

Для водораздельных болот котловинного залегания характерно наличие стока вод к болотному массиву со склонов в котловины. Они могут быть проточными, сточными или бессточными, в зависимости от чего меняется структура болотных микроландшафтов и их рисунок /9/. Общее направление линий стекания определяется в зависимости от фазы развития болотных массивов.

Верховые выпуклые болотные массивы являются, как правило, источниками питания рек. На системах выпуклых болотных массивов по сетке линий стекания определяются водоразделы и водосборы внутриболотной гидрографической сети, их структура, так как сток с них формируется под влиянием собственного рельефа болот и свойств деятельного горизонта. Большая часть влаги стекает с них к внутриболотным водотокам или к границам с суходолами путем фильтрации по деятельному слою, что следует учитывать при построении сеток линий стекания на болотах. Причем линии стекания могут быть направлены как перпендикулярно, так и под углом к внутриболотным рекам и ручьям, а также топям, которые являются водоприемниками стекающих с болота вод.

Рассмотрим характеристики основных признаков и принципов построения сетки линий стекания на болотных массивах.

Построение сетки линий стекания на болотных массивах. Совокупность проведенных на плане болотного массива линий, ортогональных к горизонталям поверхности болотного массива, называется сеткой линий

стекания /1, 5/. Сетка линий стекания является основной гидродинамической характеристикой для болотных массивов, находящихся в естественном состоянии, выражающих направление наибольших уклонов уровней болотных вод. Она определяет для любой точки на плане болотного массива направление горизонтальных составляющих скоростей фильтрационного потока в деятельном и инертном горизонтах торфяной залежи и поверхностного потока в периоды высокого стояния уровней грунтовых вод. Благодаря наличию единого водоносного горизонта в торфяной залежи болотного массива генеральное направление фильтрации воды в деятельном и инертном горизонтах совпадает с направлением поверхностного стекания и определяется уклонами общей для них пьезометрической поверхности, которой является свободная поверхность болотных грунтовых вод и которая периодически становится выше поверхности деятельного горизонта. Это характерно для ряда типов болотных микроландшафтов, в особенности травяной группы: во время высокого стояния уровней – весной и в летне-осенние дождливые периоды – характерно повышение уровней выше средней поверхности микрорельефа, вследствие чего в эти периоды движение воды совершается частично поверхностным потоком /6/.

Поскольку линии стекания определяют в каждой точке болотного массива направление горизонтального фильтрационного и поверхностного потока, с их помощью всегда можно определить величину сгущения (концентрации) или растекания потока вдоль направления линии стекания. И, соответственно, определить единичный горизонтальный расход воды в данной точке болотного массива по известному расходу в другой его точке на той же линии тока, применяя для этого уравнения неразрывности и водного баланса /6/.

Типологический план болотного массива с сеткой линий стекания строится на основе визуального дешифрирования аэрофотопланов болотных массивов, согласно правилам и приемам, изложенным в специальных руководствах и работах, упоминавшихся ранее. Основные приемы гидрологических расчетов с использованием типологических планов или АФС болот и сеток линий стекания освещены в работах /1, 5, 108/. Приемы типологического дешифрирования болот в настоящее время хорошо разработаны и обладают большой надежностью. В качестве исходных материалов для построения типологического плана болота и сеток линий стекания могут быть использованы: АФС, аэрофотопланы, уточненные аэрофотосхемы и КС сверхвысокого разрешения. В ряде случаев могут использоваться КС высокого разрешения, если не производятся расчеты или не требуется высокой точности, что актуально, например, для целей построения водоохранных зон болот и размещения планируемых объектов, коммуникаций на начальных этапах обустройства.

Вместо типологического плана можно пользоваться и непосредственно аэрофотопланом с нанесенными на нем сеткой линий стекания и границами болотных микроландшафтов.

Если при определении типов болотных микроландшафтов можно и достаточно опираться на изображение растительного покрова и его структуры (получающееся с той или иной генерализацией в зависимости от высоты и масштаба съемки), то сетка линий стекания, как и направление и скорость фильтрующих вод, естественно, не могут получать никакого отображения на аэрофото- и космическом снимке. Таким образом, для установления типов микроландшафтов и их структуры можно пользоваться большим числом прямых признаков, а все свойства их, не получающиеся изображения на аэрофото- и космическом снимке и вытекающие из известных общих взаимосвязей для данного природного объекта, использовать лишь в качестве дополнительной информации /6/.

При построении сетки линий стекания используется не непосредственное изображение, а целая система предварительно обоснованных взаимосвязей между структурой микроландшафта, мезоландшафта и макроландшафта и направлениями течения воды в фильтрационных и поверхностных потоках. Следовательно, реакция растительного покрова на направление, количество и химический состав протекающих вод, как в пределах микроландшафта, так и в пределах мезоландшафта и макроландшафта, выражающаяся в определенных структурных формах его, служит единственным критерием для установления направления течения фильтрующих и поверхностных вод. В зависимости от размеров изучаемой болотной системы степень генерализации сетки линий стекания должна быть разной. Чем больше размеры болотной системы и чем, соответственно, мельче масштаб ее изображения, тем большую площадь нужно охватить построением сетки линий стекания при том же размере чертежа. Следовательно, неизбежно должна иметь место генерализация направлений стекания, изображаемых каждой проводимой линией стекания. При дешифрировании это происходит в известной мере само собой, т.е. по мере перехода от объектов малых размеров к крупным и крупнейшим болотным системам и, соответственно, к более мелким масштабам снимков сетки линий стекания выражают все более генерализованные направления потока вод. При этом состав структурных признаков, определяющих менее и более генерализованные направления линий стекания, изменяется: утрачиваются на изображении мелкие структурные элементы, и приходится ориентироваться на более крупные структуры, присущие уже только мезоландшафтам и макроландшафтам /6/.

Рассмотрим вначале первую группу признаков, определяющих структуру микроландшафтов, т.е. наиболее мелкими структурными образованиями. К числу признаков этой группы относится ориентация элементов микрорельефа в микроландшафтах комплексного строения: грядово-мочажинных и грядово-озерных при их ленточно-грядовой структуре. Гряды, мочажины и озера, расположенные между грядами, изображаются на АФС в виде параллельных полос разной тональности и ширины, генеральное направление которых на каждом участке болотного массива сов-

падает с направлением горизонталей поверхности болота и перпендикулярно направлению максимального уклона и потока фильтрационных и поверхностных вод. Использование этого признака дает возможность весьма точно определить положение и ориентировку линий стекания на этих микроландшафтах. Однако для определения направления потока вод по линиям стекания необходимо привлекать дополнительные признаки.

При этом приходится рассматривать структурные элементы другого порядка, характеризующие строение мезоландшафтов и макроландшафтов, а также расположение последних относительно внешней гидрографической сети (речной и озерной). К числу признаков второй группы относятся /6/: расположение на болотных мезоландшафтах и форма в плане топей выклинивания, проточных топей, расположение в болотных макроландшафтах и форма в плане транзитных топей, направление и форма в плане топей, образующихся за минеральными островами, расположенными внутри болотных систем, расположение истоков и русел внутриболотных рек и ручьев, пересекающих границы болотных массивов. Если любой из этих признаков сочетается с изображением ленточно-грядовой структуры грядово-мочажинных и грядово-озерных микроландшафтов, положение линий стекания и направление потока вод определяются однозначно. На болотных системах в зоне избыточного увлажнения признаки первой и второй групп обычно сочетаются и часто накладываются друг на друга. Поэтому если АФС охватывает достаточно большую территорию болотного массива, включающую структурные признаки первой и второй групп, построение сетки линий стекания является вполне определенной и несложной задачей. Но могут встречаться случаи, когда на очень крупных по площади болотных массивах АФС охватывает только такую часть их площади, на которой имеются признаки лишь первой группы, связанные со структурой микроландшафтов. На этой части болотного массива можно было бы нанести линии стекания, пользуясь ориентацией гряд, мочагин и озер, но из-за отсутствия признаков, связанных со структурой мезо- и макроландшафта, нельзя надежно определить направления уклонов и потока вдоль линий стекания. Следовательно, нужно рассматривать такую площадь на снимке, на которой находился бы хоть один признак второй группы, позволяющий определить направление течений вдоль линий стекания. Такими признаками могут быть: положение истока ручья и облесенной полосы вдоль русла внутриболотной речки, отводящей с этой части болотного массива воды за пределы болотной системы; направление топей в виде темных полос за минеральными островами и др.

Тогда на остальной части снимка направление потока определяется по последовательному переходу от одной линии стекания к соседней /6/. При построении сетки линий стекания практически всегда приходится пользоваться не одним, а несколькими признаками.

Оптимальными масштабами для визуального построения сетки линий стекания являются такие, которые позволяют использовать одновременно

структурные признаки микроландшафтов и макроландшафтов. Эти масштабы лежат в пределах от 1 : 17 000 до 1 : 50 000. При более мелких масштабах структурные признаки микроландшафтов практически исчезают и для проведения линий стекания пользуются в основном признаками второй группы /6/.

Для различных задач генерализация сетки линий стекания и, соответственно, используемый масштаб снимка должны быть разными. Так, для задач проектирования водоохранных зон, размещения планируемых объектов и коммуникаций на первоначальных этапах обустройства приемлемыми масштабами являются КС с высоким пространственным разрешением (15–30 м). Для этих задач вполне хватает построения качественных сетей линий стекания, потому что для конкретной задачи сетки линий стекания не служат в качестве расчетной основы для гидрологических расчетов. При этих масштабах сохраняется приемлемая четкость изображения типа микроландшафтов, а также имеет место еще достаточно крупное изображение размеров площадей отдельных микроландшафтов для возможности графического построения на них линий стекания, выделения контуров границ микроландшафтов.

Основные дешифровочные признаки АФС и КС болот и поверхностной гидрографической сети на болотах приведены в табл. 1.1. В этой таблице приведены названия основных типов болотных микроландшафтов, характерных для рассматриваемого района, а также водоемы и водотоки на болотных массивах. В таблице приведены основные дешифровочные признаки для АФС и КС (ETM+/Landsat 7, каналы 5, 4, 3), ориентировки линий стекания относительно отображения на снимках, степень достоверности и достаточности признака для ориентировки линий стекания, их краткая наземная характеристика (растительность, положение на местности, источники питания), а также ссылки на соответствующие рисунки АФС и КС, иллюстрирующие изображения отдельных типов болотных микроландшафтов, а также ориентировку линий стекания на АФС и КС. Эта таблица для исследуемого района была составлена в результате многолетнего совместного использования АФС и спектрально-аналитических космических снимков для целей дешифрирования болотных массивов. При этом дешифрирование КС опиралось на богатый методический опыт визуального дешифрирования АФС, опубликованный в литературе. Для изучения изображений основных типов болотных микроландшафтов по снимкам кроме собственных полевых наблюдений на болотных массивах, проводившихся в рамках инженерно-экологических изысканий (ИЭИ), использовались опубликованные результаты геоботанических исследований болотных систем данного района /29, 31, 33, 35–37/.

Необходимо отметить, что сетка линий стекания в наших работах используется для целей определения основных (генерализованных) направлений стекания болотных вод, которые, в свою очередь, могут дешифрироваться на КС высокого разрешения. Опыт практического совместного

применения АФС и КС для дешифрирования болотных массивов (типологическая карта болотного массива и сетка линий стекания), изучения бассейнов малых рек и фрагментов более крупных водосборов показал, что применение КС обеспечивает получение достаточно надежных результатов при минимальных затратах времени и средств. Также следует подчеркнуть, что вид болот на АФС и КС и возможность их дешифрирования зависят от сезона и условий съемки. Зимний снимок покрытого снегом болота лишь в некоторых случаях позволяет определить тип болота в общих чертах. Неравноценными являются снимки болот, полученные ранней весной и поздней осенью. Окраска растительного покрова болота в эти периоды резко отличается от окраски растительности в летний период. Кроме того, болота весной и осенью бывают сильно обводнены, а частично и залиты водой. Поэтому в нашей работе рассматриваются дешифровочные признаки для снимков, сделанных в летние периоды.

1.6.1.2. Методика визуального дешифрирования цифровых многозональных космических снимков

Понятие о цифровом космическом снимке. Компьютерные способы обработки позволяют эффективно извлекать информацию об объектах из цифрового КС, определяя зарегистрированную на нем величину отраженного или собственного излучения объекта, т.е. радиометрические характеристики (от англ. radiance – сияние, энергетическая яркость) /104/.

Цифровым снимком называют /109/ изображение земной поверхности, которое записано в виде цифровых значений на магнитном носителе и может быть визуализировано на экране монитора. В отличие от снимка, представленного в фотографическом виде, где изображение непрерывно, цифровой снимок состоит из дискретных элементов изображения – пикселей (от англ. picture element). Размер пикселя определяет пространственное разрешение цифрового снимка. В пределах пикселя изображение однородно, так как яркости всех объектов интегрируются независимо от того, насколько сильно они различаются /109/.

Каждый из пикселей имеет координаты в цифровой записи: номер строки (x) и номер столбца (y). Началом координат служит первый пиксел (левый верхний пиксел изображения), номер строки возрастает при движении вниз, а столбца – вправо.

В радиометрическом отношении цифровой снимок также дискретизирован. Например, если на описание одного пикселя выделяется 8 бит (1 байт), то характеристика яркости может принять 256 различных значений, так как каждый бит может принять 2 значения, следовательно, число возможных значений определится как $2^8 = 256$. Номер уровня яркости, или кодированное значение яркости, представляет третью координату пикселя цифрового снимка. В многозональном снимке пикселу с определенными координатами x, y соответствует несколько значений яркости, по числу

съемочных зон. Так, каждому пикселу изображения, полученного со спутника ETM+/Landsat 7 (7 зон), соответствует $8 \times 7 = 56$ бит информации. Таким образом, снимок представляет собой матрицу значений яркости, что позволяет обрабатывать данные с помощью компьютера.

Яркостные преобразования снимков

Методы улучшающих преобразований обычно применяют в качестве первого шага в использовании снимков: для идентификации изобразившихся областей и объектов, определения их местоположения и для извлечения информации об их изобразительных свойствах и признаках. Основная цель яркостных преобразований направлена на облегчение визуального дешифрирования, повышение его объективности и достоверности, а также подготовку снимков к последующему автоматизированному дешифрированию. Однако в некоторых случаях они могут служить конечным результатом дешифрирования. Выбор той или иной процедуры улучшения зависит от квалификации пользователя, его опыта дешифрирования; при этом пользователь должен:

- знать параметры используемых диапазонов съемки до выполнения процедур улучшения;
- иметь ясное представление о цели исследования и его предполагаемом результате (например, повышение резкости – контраста – изображения для идентификации объектов или построения обучающих выборок для автоматизированного дешифрирования).

Яркостные преобразования включают два типа операций /110/:

- радиометрическая и геометрическая коррекция снимков, которая выполняется для устранения дефектов, связанных с технологическими свойствами системы или условиями съемки;
- улучшение цифровых изображений.

Исходные цифровые значения снимка (в англоязычных руководствах их называют «сырые значения», или DN_s), представляя его спектральную яркость, определяются числом и положением уровней квантования в радиометрическом диапазоне. Радиометрическая коррекция имеет дело с варьированием значений яркости пикселей, причиной которых не является сам объект или сканируемое изображение. Такое варьирование определяется:

- сбоем или неисправностью детекторов;
- влиянием рельефа;
- атмосферными эффектами.

Методы радиометрической коррекции показателей датчиков обычно предоставляют разработчики конкретной съемочной аппаратуры. Выполняется для изображений, полученных в видимой и ИК областях спектра. Труднее всего поддается коррекции влияние рельефа, что требует хорошего знания территории, характеристик системы и условий съемки. Особое внимание уделяется учету влияния атмосферы.

Влияние атмосферных эффектов на ДДЗ не рассматривается как ошибка, такие эффекты – часть получаемого датчиком сигнала. Однако зачас-

тую важно их устранить, особенно для целей яркостной «подгонки» кадров и анализа изменений.

Алгоритмы коррекции изменений отражательных свойств объектов, переданных через атмосферу, разрабатывают на протяжении многих лет существования ДЗ. Среди них основные – четыре категории /110/:

- вычитание темных пикселей;
- преобразование показателя энергетической яркости в коэффициент отражения;
- исследование линейных регрессий;
- моделирование влияния атмосферы.

В пакете ERDAS Imagine для выполнения этих операций используют алгоритмы модуля Spatial Modeler /94/.

Геометрическая коррекция предназначена для устранения искажений в относительном позиционировании пикселей, причиной которых в основном являются погрешности датчика. Подобные искажения проявляются на снимках в виде полосчатости изображения и выпадения значений отдельных строк в цифровой записи. Для устранения полосчатости в ERDAS Imagine используют модули Image Interpreter или Spatial Modeler /94/.

Как отмечено выше, для устранения искажений изображений земной поверхности необходима геометрическая коррекция данных съемки. Одна из основных проблем при использовании информации, содержащейся в снимках – это изменения масштаба изображения в пределах каждого снимка в результате искажений, источники которых многообразны: фокусное расстояние оптической системы, геометрия проекции и охват территории, рельеф поверхности. На сегодняшний день некоторые из искажений устраняют в центрах получения и обработки данных ДЗ перед их распространением. Например, данные Landsat 7 уровня L1G уже прошли радиометрическую и геометрическую калибровку.

Процедуры геометрической коррекции снимков выполняют для того, чтобы изображение земной поверхности было правильно представлено на плоскости и имело свойства карты. Необработанные снимки, получаемые со спутников и самолетов, являются плоскими изображениями, создаваемыми системами съемки, но даже для кажущейся ровной поверхности искажены за счет кривизны поверхности Земли и применяемого датчика.

Известно, что существуют разные методы построения картографических проекций, различающиеся способом проектирования сферы на плоскость и допустимыми значениями искажений расстояний, углов и площадей. Например, для сохранения равенства площадей, могут быть искажены формы отдельных областей, углы и масштаб в отдельных частях карты /111/. Свойства картографических проекций подробно представлены в учебниках по картографии, например А.М. Берлянта /112/, Б.Б. Серапинаса /113/. Знание свойств проекций необходимо для определения размеров объектов по их изображениям на снимках, сопоставления областей землепользования, плотности (населения) и для многих других задач. Каждой картогра-

фической проекции соответствует система координат, определяемая типом координатной сетки на карте, а для снимков (растровых изображений), как известно, принята прямоугольная система координат строк и столбцов.

Решение многих задач требует предварительного выполнения трансформирования. Среди них /110/:

- выявление изменений на разных снимках одной территории, когда требуется попиксельное сопоставление изображений;
- создание мозаик изображений и фотокарт;
- использование снимков в ГИС, в том числе совместно с векторными изображениями;
- получение точных величин расстояний и площадей;
- выполнение географического анализа, требующего точной локализации данных.

Для получения реального представления о местонахождении, взаимном расположении и размерах отображаемых объектов выполняется дополнительная обработка снимков.

В общем случае эту обработку можно разделить на два основных этапа /114/:

1. **Трансформирование изображения**, под которым понимается процесс преобразования изображения с целью приведения его к заданным масштабу и проекции с устранением смещений из-за наклона оси съемки, рельефа местности и кривизны поверхности Земли, а также с исключением геометрических искажений.

2. **Привязка изображения**, заключающаяся в точной идентификации участка земной поверхности, отображенного на изображении, и присвоении каждой точке изображения реальных координат, совпадающих с координатами данной точки на местности.

В случае снимков для равнинных участков территории искажения, вызванные рельефом, невелики и ими пренебрегают. Однако для холмистой местности эти искажения становятся значительными. В таких случаях снимки трансформируют по частям (зонам), границы которых определяют по максимально допустимым разностям высот в каждой из выделяемых зон. Такой способ называется **ортотрансформированием** изображений /114/.

Привязка изображения заключается в отыскании на изображении точек, обычно связанных с какими-либо объектами, координаты которых известны. Чем больше используется таких точек, тем точнее будет привязка и трансформирование изображения.

При выполнении привязки и трансформирования изображений можно выделить следующие четыре основных этапа /114/:

1. Выбор геометрической модели трансформирования.
2. Задание опорных точек.
3. Преобразование координат изображения на основе выбранной геометрической модели.
4. Трансформирование растрового изображения в соответствии с преобразованными координатами (создание новой сети пикселей).

При этом выбор геометрической модели трансформирования зависит от того, какие преобразования изображения планируется произвести (сдвиг, поворот, изменение размеров, изменение проекции и т.д.). Задание опорных точек носит чисто технологический характер и может осуществляться различными способами (по другому изображению, пространственное положение которого известно; путем считывания координат точек из файлов; задания координат с клавиатуры; с помощью дигитайзера).

Алгоритмы трансформирования снимков (преобразование координат изображения)

Выбор степени полинома для преобразования исходных растровых координат снимка в координаты базовой карты или эталонного снимка зависит от характера искажения изображения, числа используемых контрольных точек и их расположения относительно друг друга. Желательно, чтобы контрольные точки располагались равномерно по всему полю изображения, чем равномернее распределение точек, тем надежнее результаты трансформирования. Обычно для трансформирования снимков используют полиномы не выше третьей степени, которые позволяют выполнить линейные (аффинные) и нелинейные преобразования координат /110/.

В практике автоматизированного цифрового трансформирования встречаются следующие основные геометрические модели преобразования координат /114/:

- **Аффинная** – основная геометрическая модель линейных преобразований изображения, таких, как сдвиг, поворот, изменение размеров;
- **Полиномиальная (аппроксимационная)** – использует для привязки и трансформирования изображения методы аппроксимирования координат полиномами различных порядков;
- **Модель «резинового листа» (интерполяционная)** – заданные опорные точки изображения при использовании этой модели являются фиксированными и не меняют своих координат в процессе трансформирования, положение остальных точек вычисляется на основе интерполяции координат (этот процесс можно проиллюстрировать растяжением резинового листа с нанесенной на него координатной сеткой так, чтобы определенные точки заняли положение с определенными координатами);
- **Специальные** – представляют собой модификации или комбинации различных методов для более эффективной трансформации изображений, получаемых из разных источников (аэросъемка, спутники Landsat, Spot, QuickBird, IKONOS.).

Наиболее часто для решения задач трансформирования применяется полиномиальная модель или ее разновидности.

Чем выше порядок аппроксимирующего полинома, тем точнее обработка изображения, но тем больше для этого требуется опорных точек. Минимальное число точек при аппроксимации полиномом первого порядка – 3, полиномом второго порядка – 6, полиномом третьего порядка – 10 и т.д. Для обеспечения достаточного уровня точности обычно требуется число точек, равное удвоенному минимальному.

Расхождение между заданным положением опорных точек и полученным после аппроксимации оценивается с помощью среднеквадратического отклонения (RMS Error). При его расчете используются файловые координаты точек, т.е. координаты соответствующих пикселей. Желательно, чтобы среднеквадратическое отклонение было меньше 1. В данном случае ошибка не будет превышать одного пиксела.

Переопределение значений пикселей трансформированного снимка

Следующая процедура в процессе трансформирования – создание выходного файла изображения, с сохранением яркостной структуры исходного изображения. Необходимость переопределения значений яркости пикселей в соответствии с их новым положением возникает из-за того, что сетка пикселей в исходном изображении редко соответствует сетке эталонного изображения. Она может иметь другое разрешение и направление осей /110/.

Вследствие того, что растровое изображение имеет дискретную структуру (состоит из пикселей), при его трансформировании возникает проблема сохранения спектральных (цветовых) характеристик трансформированного изображения. При трансформировании растрового изображения обычно нет прямого соответствия между пикселями исходного и трансформированного изображения, т.е. участки равной площади (на местности) описываются разным количеством пикселей на исходном и трансформированном изображениях. Возникает ситуация, при которой точка, совпадающая с центром какого-либо пикселя на исходном изображении, на трансформированном изображении оказывается на краю пикселя или даже на границе между пикселями. Поэтому напрямую передать значения пикселей не удается.

Для назначения подходящих значений яркости трансформированным пикселям в программах обработки изображений применяют методы интерполяции:

- метод ближайшего соседа;
- метод билинейной интерполяции;
- метод кубической интерполяции (интерполяция полиномом 3-й степени).

Метод **ближайшего соседа** является простейшим и самым быстрым из трех методов вычислений. В данном случае пиксел трансформированного изображения получает значение, равное значению того пикселя исходного изображения, центр которого находится ближе всего к точке, соответствующей координатам центра пикселя.

К преимуществам данного метода можно отнести следующее /114/:

- Передаются оригинальные значения пикселей без их усреднения, как в других методах. Поэтому сохраняются экстремальные значения и слабо различающиеся значения. Это является очень важным при идентификации разных типов растительного покрова, определении границ объектов и т.п.

- Самый простой и легко реализуемый из всех применяемых.
- Подходит для трансформирования тематических растровых данных, значения пикселей которых являются качественными. Другие методы не могут работать с таким типом данных.

Недостатки метода «ближайшего соседа» следующие /114/:

- Когда данный метод используется при трансформировании растра с меньшим разрешением в растр с большим разрешением, обычно наблюдается эффект ступенчатости диагональных линий и кривых.
- Некоторые значения могут быть утеряны, а другие дублированы.
- Могут возникнуть разрывы узких линий на изображении (дороги, реки и т.д.).

Метод билинейной интерполяции предполагает использование значений четырех пикселей исходного изображения, наиболее близких к точке, соответствующей координатам пикселя трансформированного изображения.

Преимущества метода билинейной интерполяции следующие:

- На трансформированном снимке нет эффекта ступенчатости диагональных и кривых линий.
- Большая пространственная точность, чем при использовании метода «ближайшего соседа».
- Данный метод является наиболее эффективным, когда требуется изменить размеры пикселя (изменить разрешение изображения).

В качестве недостатка данного метода можно указать на эффект снижения пространственной частоты изображения ввиду усреднения значений пикселей. Это приводит к размыванию границ между объектами и потере четкости.

Метод часто применяют при изменении размера ячеек сетки (разрешения) исходного изображения, например при совмещении снимков, полученных системами ЛандсатТМ и SPOT /110/.

Метод **кубической интерполяции** аналогичен предыдущему, но для вычисления значения каждого пикселя трансформированного изображения использует значения 16 пикселей исходного (участок 4×4), интерполируя их значения полиномами 3-й степени.

Преимущества данного метода заключаются в следующем /114/:

- Использование значений 16 пикселей приводит к тому, что среднее значение и стандартное отклонение значений пикселей в исходном и трансформированном изображении отличаются намного меньше, чем при использовании других методов.
- Использование полинома 3-й степени при определенных характеристиках изображения позволяет одновременно сохранить четкость изображения и избежать появления искажений.
- Данный метод является предпочтительным, если требуется произвести трансформирование, связанное с существенным изменением размера пикселя (существенным изменением разрешения).

К недостаткам метода можно отнести:

- Значения некоторых пикселей могут значительно измениться.
- Наиболее сложный из рассмотренных методов. Поэтому требует при своей реализации больше времени на выполнение расчетов.

И все же, несмотря на надежность описанных методов, в процессе трансформирования некоторая спектральная целостность может быть утрачена. Нетрансформированное изображение является спектрально более верным. Поэтому, в частности, рекомендуют проводить классификацию по исходным снимкам, а трансформировать уже изображение, созданное в результате классификации. Исключением является наличие для исследуемой территории наземных контрольных точек, полученных с помощью спутниковых систем позиционирования. Тогда новая система координат поможет лучше локализовать эталонные участки /110/.

Улучшение цифровых изображений. Преобразование снимков и создание производных изображений

Улучшением цифрового изображения называется такое преобразование его характеристик, которое связано с повышением четкости, уменьшением влияния помех и облегчением дальнейшего анализа визуальными и цифровыми методами. Оно направлено на выделение необходимой и удаление излишней информации. Следует подчеркнуть, что преобразование изображения не добавляет новой информации, а только приводит ее к виду, удобному для дальнейшего использования.

Улучшения читаемости цифрового изображения можно достичь различными способами, связанными с изменением яркости, контрастности, цветового баланса, подбором цветового синтеза КС, фильтрацией, пространственным улучшением снимков, а также созданием новых производных изображений, а именно индексных изображений, изображений преобразованных по методу Томаса-Каута и главных компонентов и др. В любом из этих случаев происходят изменения в исходных данных, которые заключаются в коррекции значений спектральных (цветовых) характеристик пикселей, составляющих изображение. Иначе говоря, происходит пересчет значений характеристик пиксела в каждом канале изображения в соответствии с каким-либо заранее установленным законом. В этом смысле особую важность получают статистические характеристики изображения.

Статистические характеристики изображения описываются в заглавной части файла данных и включают такую цифровую информацию, как минимальное, максимальное, среднее значение частот появления в изображении пикселей с определенной характеристикой, а также медиану, моду и стандартное отклонение. Графическим представлением распределения спектральных характеристик является гистограмма (рис. 1.18, см. цв. вкладку). Гистограмма представляет собой оценку плотности распределения значений файловых пикселей и показывает, какое число пикселей изображения соответствует каждому из 256 значений спектральной характеристики. Гистограмма строится отдельно для каждого канала изображения.

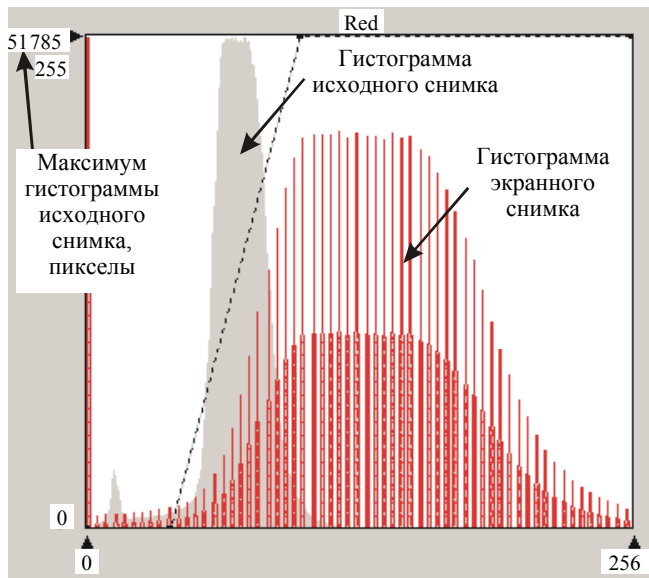


Рис. 1.18. Гистограмма канала Red растрового изображения

Методы улучшения читаемости изображений можно разделить на две большие группы:

- методы, основанные на анализе спектральных характеристик;
- методы, основанные на анализе пространственных характеристик.

Методы, основанные на анализе спектральных характеристик

Данные методы улучшения основаны на корректировании исходной гистограммы изображения путем пересчета значений всех пикселей по определенному закону. Они позволяют регулировать такие характеристики изображения, как яркость, контрастность и цветовой баланс.

Обычно общий диапазон яркостей снимка составляет лишь часть максимально возможного. Поэтому появляется возможность увеличить контрастность изображения, растянув гистограмму так, чтобы она занимала как можно большую часть диапазона. Так, для снимков Landsat с 8-битовым радиометрическим разрешением значения спектральной яркости могут изменяться от 0 до 255. Увеличение контрастности достигается за счет увеличения разности значений, т.е. увеличения различия в цвете между пикселями. Увеличения яркости можно достичь, сдвигая гистограмму в сторону больших значений интенсивности.

Преобразование гистограммы осуществляется за счет пересчета значений файловых пикселей (файловых значений) по определенному закону. Пересчитанные значения записываются в таблицу отображения Look Up Table (LUT) и используются для генерации изображения на экране. Эти значения называются дисплейными или LUT-значениями. Иллюстрация пересчета значений спектральных характеристик приведена на рис. 1.19.

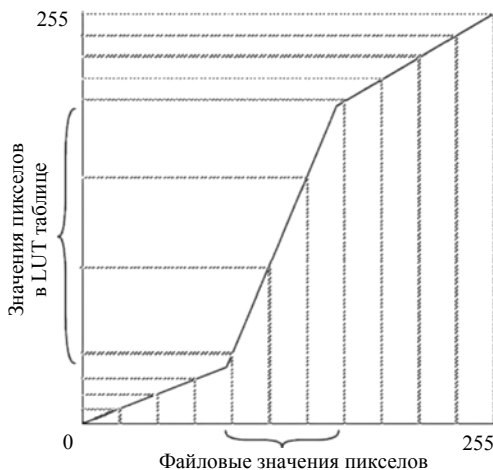


Рис. 1.19. Иллюстрация пересчета значений пикселей при преобразовании контрастности

На рис. 1.19 по оси абсцисс откладываются файловые значения пикселей, а по оси ординат – значения в LUT-таблице. График, показанный сплошными отрезками прямых, представляет собой закон пересчета значений. Пунктирные линии показывают, каким образом получаются значения пикселей в LUT-таблице: значение пиксела откладывается на оси абсцисс, определяется соответствующая ему точка на графике, а затем, считывая значение ординаты этой точки, получаем LUT-значение. Как видно из рисунка, таким образом можно увеличить контрастность в одной части диапазона и уменьшить в другой. В диапазоне, помеченном фигурной скобкой, произойдет существенное увеличение контрастности, в других же двух крайних диапазонах будет наблюдаться ее снижение. Таким образом, меняя закон пересчета значений пикселей в каждом канале, можно достичь требуемых характеристик яркости, контрастности и цветового баланса. Законы пересчета могут быть различными и делятся на три основных группы: линейные, кусочно-линейные и нелинейные.

Для изменения и выбора оптимальной кривой воспроизведения яркости целесообразно использовать гистограмму яркостей цифрового снимка – график, показывающий по оси абсцисс значения яркости, а по оси ординат – количество пикселей с такими значениями. Для удобства выбора кривой с помощью программных средств выводят на экран совмещенное изображение гистограммы яркостей исходного снимка и кривой воспроизведения яркостей. Программы обработки снимков позволяют вручную задавать произвольную форму кривой, а также выводят на совмещенный график получаемую при таком варианте кривой гистограмму экранного снимка, по которой можно судить, сколько пикселей соответствует каждой градации яркости на экране (рис. 1.18, см. цв. вкладку). Чем равномернее распределяются пиксели на гистограмме, тем больше оттенков можно различить на экранном изображении.

При отображении непрерывного растрового изображения обычно по умолчанию происходит растяжка гистограммы в два стандартных отклонения. Это означает, что значения пикселей, попавшие в диапазон, равномерно растягиваются по диапазону от 0 до 255; пикселям с файловым значением менее присваивается LUT-значение, равное нулю, а пикселям с файловым значением более – LUT-значение, равное 255.

Кроме того, существует целый ряд других стандартных законов пересчета гистограммы. Среди них следует выделить:

Выравнивание гистограммы – перераспределение данных таким образом, чтобы приблизительно одно и то же количество пикселей изображения попадало в каждый интервал гистограммы (в одинаковые диапазоны значений).

Закон стандартных отклонений – растяжка гистограммы в заданное количество стандартных отклонений. Количество отклонений должно быть задано перед началом пересчета. Суть растяжки гистограммы в два стандартных отклонения была изложена выше, растяжка в другое количество стандартных отклонений происходит аналогично.

Приведение к нормальному закону распределения – в результате пересчета по данному закону гистограмма имеет закон распределения, близкий к нормальному с заданными параметрами.

Линейный закон – результирующее LUT-значение характеристики пиксела получается в результате умножения файлового значения на задаваемую пользователем константу. Если получаемое значение оказывается больше 255, то данному пикселу присваивается значение 255. Данный закон позволяет регулировать яркость в каждом канале.

Приведение к гамма-закону распределения – в результате пересчета по данному закону гистограмма имеет закон распределения, близкий к гамма-закону.

Растяжка от минимума до максимума – значения пикселей из диапазона от минимального значения до максимального равномерно (линейно) растягиваются по диапазону от 0 до 255.

Деление на зоны – диапазон значений файловых пикселей (от 0 до 255) делится на заданное количество частей N . Каждой части присваивается постоянное LUT-значение, полученное в результате деления заданного диапазона вывода на N частей. Кривая данного закона пересчета имеет вид лестницы.

Присваивание константы – всем пикселям канала присваивается одно и то же заданное значение. В результате применения этой процедуры ко всем зонам изображения все пиксели будут иметь один и тот же цвет.

Закон, обратный заданному, – в результате получается гистограмма, пересчитанная по закону, обратному тому, по которому она была пересчитана перед этим. При этом получается изображение, негативное по отношению к исходному.

После преобразований гистограмм яркостей спектральных каналов возможно визуальное дешифрирование мультиспектральных снимков. В основном применяются три основных методических приема:

- дешифрирование одного зонального снимка;
- дешифрирование серии зональных снимков;
- дешифрирование цветного синтезированного снимка.

Дешифрирование одного зонального снимка проводится в том случае, если одна из съемочных зон в наибольшей степени удовлетворяет поставленной задаче. Часто таким оказывается снимок в ближней инфракрасной зоне. Вследствие свойства водной поверхности поглощать излучение этой части спектра, водные объекты изображаются самыми темными, что облегчает дешифрирование элементов гидрографии – рек и ручьев, береговой линии озер и морей. Так, на фрагменте КС (рис. 1.20) уверенно дешифрируются меандрирующая река (1), старицы с открытой поверхностью воды (2) и с влаголюбивой растительностью (3), а также озера (4) на болотах. При дешифрировании микроландшафтов болотных массивов также целесообразно использовать снимки в этой зоне, так как в этой зоне наблюдаются наибольшие различия по типам растительности на микроландшафтах, что позволяет наиболее уверенно проводить их границы.

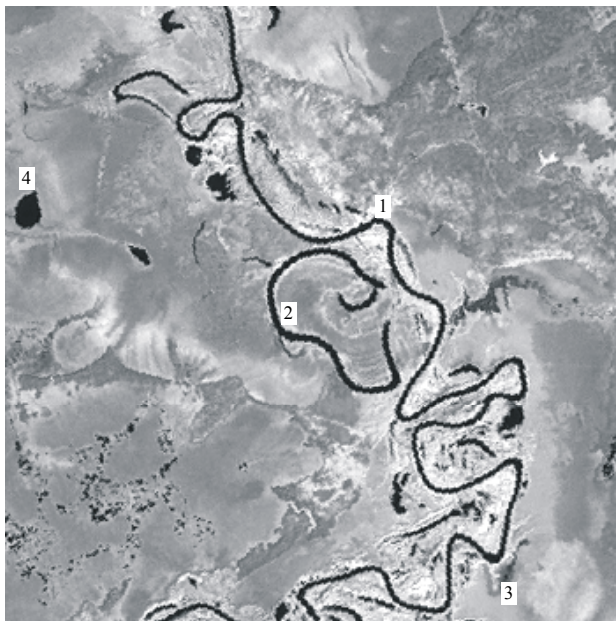


Рис. 1.20. Изображение элементов гидрографической сети на космическом снимке ETM+/Landsat 7 в ближней инфракрасной зоне (обозначения даны в тексте)

Серия зональных снимков представляет спектральный образ объектов и благодаря этому может быть использована для выявления их сущности. Этот методический прием применяется и при визуальном дешифрировании экранного изображения цифрового снимка, и при работе с фотоотпечатками.

Для большинства съемочных систем характерны относительно широкие зоны видимого участка спектра, поэтому даже у наиболее спектрально селективных объектов, например растительности, различия яркости невелики и глазом улавливаются не всегда. Изображения же в ближней инфракрасной зоне при сравнении с одной из зон видимой части спектра всегда существенно отличаются. Как следствие, во многих случаях для распознавания объектов используют только два снимка: в одной из зон видимой части спектра, чаще красной, и ближней инфракрасной. Так, в работе /115/ говорится о целесообразности использования именно этих зон для дешифрирования почв по прямым признакам, так как кривые спектральной отражательной способности почв расходятся максимально и различия коэффициентов спектральной яркости наибольшие. Это характерно и для рассматриваемых нами болотных микроландшафтов.

В качестве примера рассмотрим возможности визуального дешифрирования многозонального снимка для дешифрирования болотных массивов. На двух зональных снимках КС (рис. 1.21) изображен участок болотного массива. На снимке в красной зоне отчетливо дешифрируется граница болотного массива с суходолом. Болото имеет светлый фототон (1) с многочисленными озерами и озерами.

Массивы лесной растительности отличаются темным изображением (2), несколько более светлым – возобновляющиеся гари мелколиственных лесов (3). Еще более светлым фототонном изобразились на снимке вырубки (4), которые очень близки по фототону с болотами. Хорошо различаются от общего фототона техногенные объекты (кустовые площадки, дороги, промзоны), которые имеют на снимке самый светлый, почти белый фототон (5).

По-другому выглядят те же объекты на снимке в ближней инфракрасной зоне. Так, на болотном массиве наблюдается более пестрое различие болотных микроландшафтов по типам растительности. Здесь также болота имеют более светлый фототон (1), чем массивы лесной растительности (2). Наиболее светлым тоном изобразились на снимке возобновляющиеся гари (3) и вырубки (4), которые очень близки по фототону с мохово-травяными топиями (5). Отчетливо выделяются изображения водных объектов (6). Последовательный или сопоставительный анализ двух зональных снимков в этих зонах способен обеспечивает распознавание изучаемых объектов.

Использование цветных синтезированных снимков – наиболее эффективный прием визуального дешифрирования многозональных снимков.

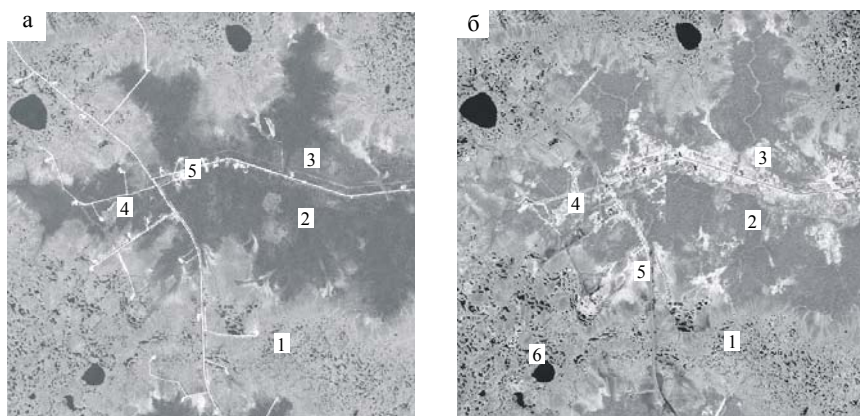


Рис. 1.21. Фрагменты многозонального космического снимка ETM+/Landsat 7:

а) красная зона 0,63–0,69 мкм; б) ближняя инфракрасная 0,75–0,9 мкм (обозначения даны в тексте).

Цветное изображение лучше воспринимается зрением, чем черно-белое, а иметь дело с одним снимком проще, чем с несколькими. В случае визуального дешифрирования на компьютере возможности выбора наиболее подходящего варианта синтеза значительно шире, поэтому многозональные снимки используются чаще именно в этом виде.

Синтезирование цветных изображений на экране компьютера осуществляется аддитивным способом: смешивается свет от зеленого, синего и красного элементов-люминофоров, который включает каждый пиксел экрана. Для обозначения этого способа цветовоспроизведения принято употреблять английскую аббревиатуру RGB (Red, Green, Blue – красный, зеленый, синий). Обычно снимки используются в двух стандартных вариантах синтеза – с изображением растительности красным цветом (так называемый «американский» вариант) и с изображением растительности зеленым цветом (известный как «европейский» вариант). Первый рассчитан на наиболее контрастное изображение растительности, красные тона которой резко выделяются на голубоватом фоне непокрытых растительностью почв или горных пород. Для заболоченных районов в этом варианте синтеза растительность имеет красные тона, выделяющиеся на зеленоватом и светло-розовом фоне болот, но имеет место сходство с лесной растительностью мохово-травяных топей, которые также имеют красноватый оттенок (рис. 1.22 (а), см. цв. вкладку). Второй вариант предусматривает цветопередачу, приближенную к натуральной, когда вегетирующая растительность имеет зеленый цвет, а открытые почвы – коричневые оттенки. В этом варианте болота светло-коричневатого и светло-фиолетового тона, выделяются на общем зеленом фоне лесов. Но также наблюдается сходство мохово-травяных топей с лесной растительностью на суходолах (рис. 1.22 (б), см. цв. вкладку). Вследствие этого для изучения и выделения исследуемых нами объектов необходимо выполнение целенаправленного подбора синтеза. Особенно актуально это в отношении изучения болотных массивов, так как различные типы болотных микроландшафтов различаются по цвету изображения не очень сильно и необходимо использовать возможность увеличения цветовых контрастов их изображения за счет различных вариантов цветового синтеза. Так, в работе /116/ приводится анализ различных вариантов цветового синтеза для разделения по цвету основных открытых типов почв лесостепной зоны. В качестве рекомендуемого в этой работе предложен вариант цветового синтеза Red – зеленая или красная зона, Green – ближняя ИК зона, Blue – средняя ИК зона.

Выполним целенаправленный подбор синтеза для изображений болотных микроландшафтов. Необходимо использовать возможность увеличения цветовых контрастов их изображения за счет различных вариантов цветового синтеза.

Спектральные зоны должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить максимальное различие объектов. По спектральной отражательной способности все множество природных объектов, как известно,

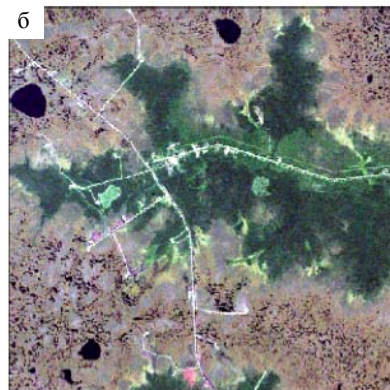
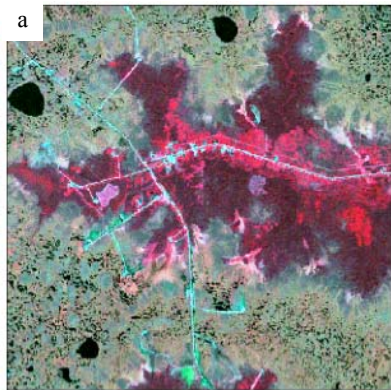


Рис. 1.22. Фрагменты многозонального космического снимка ETM+/Landsat 7 в двух принятых вариантах цветового синтеза:

а) «американский» вариант цветового синтеза [RGB – ближний ИК (0,76–0,9 мкм), красный (0,63–0,69 мкм), зеленый (0,52–0,6 мкм)];

б) «европейский» вариант цветового синтеза [RGB – красный (0,63–0,69 мкм), зеленый (0,52–0,6 мкм), голубой (0,45–0,52 мкм)].

условно разделяют на четыре класса: горные породы, растительность, водные поверхности, снежные поверхности. Таким образом, болотные ландшафты можно отнести к двум классам одновременно – к растительности и к водным поверхностям.

Методика выбора оптимального для отражения болотных микроландшафтов варианта цветового синтеза отрабатывалась на примере снимка, полученного со спутника Landsat-7 (система ETM+) в летний период с полным набором спектральных каналов (табл. 1.2) на рассматриваемую нами территорию с высокой степенью заболоченности.

Для выбора оптимального варианта цветового синтеза, с более четким разделением основных типов болотных микроландшафтов по цвету их изображения на снимке, необходимо опираться на анализ различий спектральных образов, характерных для разных типов болотных микроландшафтов. В связи с этим по КС был проведен набор кривых спектральной яркости для основных типов болотных микроландшафтов в 6 каналах съемки (1–5 и 7 зоны, с разрешением 30 м) системой ETM+ спутника Landsat 7, встречающихся на данной территории. Все работы выполнялись в программе ERDAS Imagine 8.6. Для каждого типа болотных микроландшафтов набирали 10 таких кривых (рис. 1.23, см. цв. вкладку). На кривых спектральной яркости по горизонтальной оси показаны номера зон съемки, а по вертикальной – значения яркости изображения в условных единицах от 0 до 255.

Это позволило затем получить осредненные кривые, достаточно хорошо отражающие спектральные особенности основных типов болотных микроландшафтов (рис. 1.24, см. цв. вкладку), которые могут служить в качестве эталонных при изучении микроландшафтов и являются прямыми дешифровочными признаками.

Анализ кривых спектральной яркости показывает, что красный, ближний и средний ИК каналы наиболее информативны для разделения всех основных типов болотных микроландшафтов.

Таким образом, для дешифрирования изображений болот более целесообразно выбирать красный и ИК диапазоны спектра. Однако для получения интегральных характеристик распределения фототона при проведении цифровой обработки данных необходимо использовать все три спектральных канала.

В 3-й, красной зоне (0,63–0,69 мкм) наблюдается снижение значений яркости болотных микроландшафтов по сравнению с 1-й и 2-й зонами съемки. Различия в яркости изображения группы сосново-сфагново-кустарничковых и группы сфагново-осоково-пушицевых микроландшафтов составляет в этой зоне около 17 условных единиц яркости (при полном яркостном диапазоне 0–255 ед.), а группы сфагново-кустарничково-сосновых и сильно обводненных грядово-мочажинных со сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцериево-осоковыми и сфагново-осоково-очеретниковыми мочажинами различаются на 5 условных единиц яркости. Сфагново-

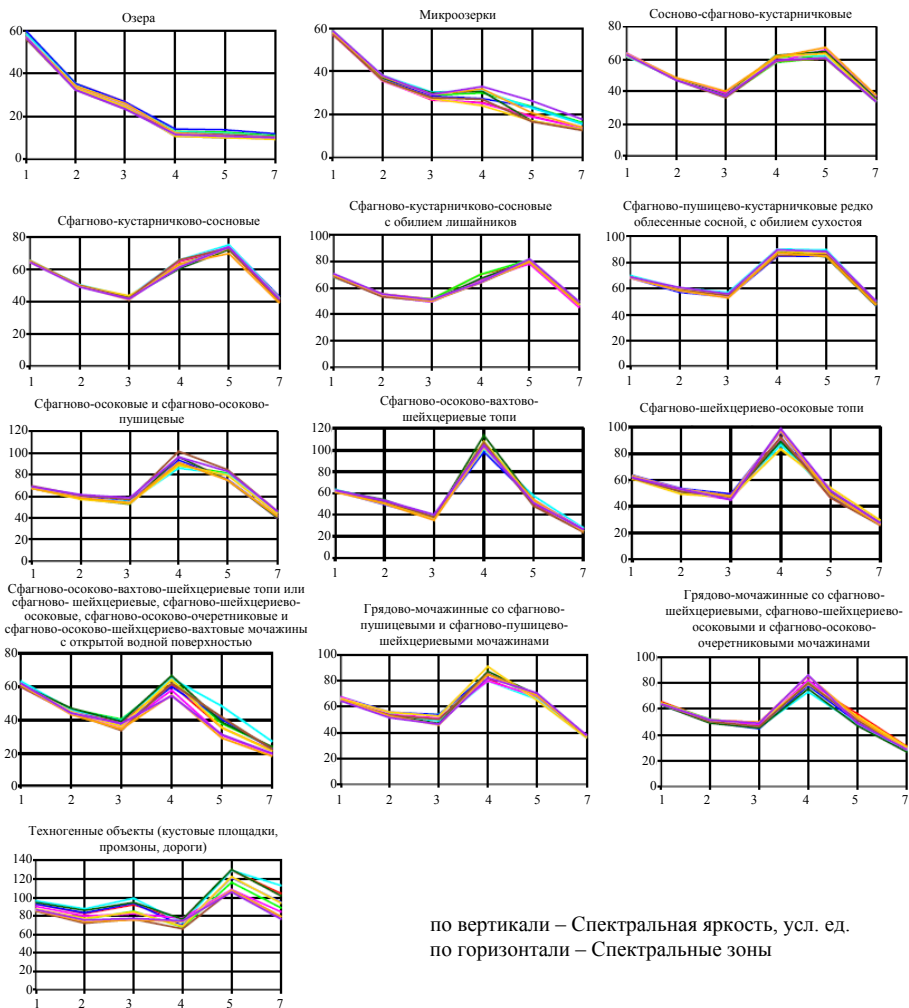


Рис. 1.23. Кривые спектрального образа основных типов болотных микроландшафтов, полученные по снимку ETM+/Landsat 7

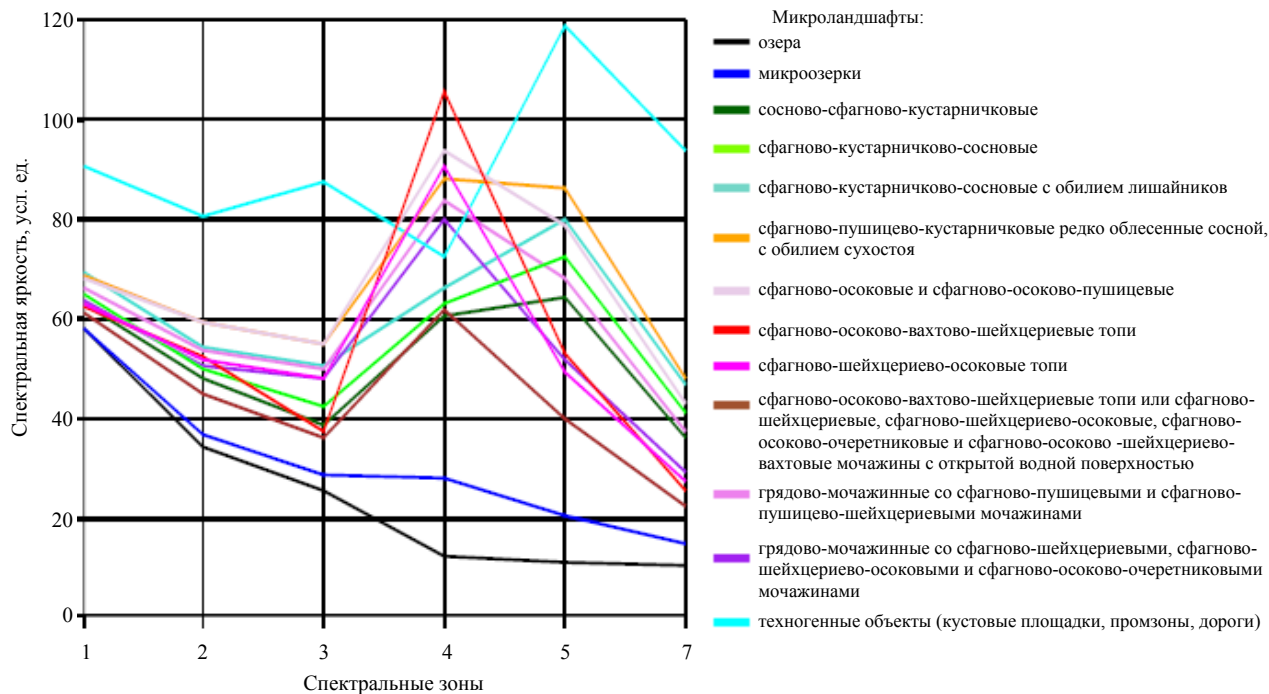


Рис. 1.24. Осредненные кривые спектрального образа основных типов болотных микроландшафтов

Т а б л и ц а 1.2

Спектральные зоны съемки сканирующей системой ETM+/Landsat 7
и основные решаемые задачи по этим зонам

Зона съемки	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Решаемые задачи
1	2	3	4
1 (голубой, синий диапазон)	0,45–0,515	30	Изучение подводной растительности, мутности воды, водных осадков и загрязнения воды. Выявление дымовых факелов. Хорошо отличает облака от снега и горных пород, а также голые почвы от участков с растительностью
2 (зеленый, желтый, часть оранжевого диапазона)	0,525–0,605	30	Оценка состояния зеленой растительности. Чувствителен к мутности воды, осадочным шлейфам и факелам выбросов
3 (красный диапазон)	0,63–0,69	30	Оценка поглощения хлорофилла для определения типа растительности, большинства почв
4 (красный, ближний ИК диапазоны)	0,75–0,90	30	Оценка отражения радиации в ближнем инфракрасном диапазоне для определения биомассы растительности. Максимально чувствителен к различиям породного состава. Выделение водных объектов
5 (средний ИК диапазон)	1,55–1,75	30	Оценка влагосодержания растительности и почв. Разделение снежного и облачного покровов, сухого и влажного снега
6 (дальний ИК (тепловой) диапазон)	10,40–12,5	60	Картографирование температур поверхности. Определение влажности почв

1	2	3	4
7 (средний ИК (2-й) диапазон)	2,09–2,35	30	Оценка влагосодержания растительности. Распознавание типов горных пород. Определение гидротермальных объектов. Оценка содержания ионов окиси водорода в почве
8 (панхроматическое изображение)	0,52–0,90	15	Детальное картографирование

пушицево-кустарничковые редко облесенные сосной с обилием сухостоя и сфагново-осоковые, сфагново-осоково-пушицевые микроландшафты в этой зоне не различимы.

В 4-й, ближней ИК зоне (0,75–0,9 мкм) в ходе кривых малооблесенных и необлесенных микроландшафтов (сфагново-пушицево-кустарничковые редко облесенные сосной, с обилием сухостоя; сфагново-осоковые и сфагново-осоково-пушицевые; сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые, сфагново-шейхцеригово-осоковые топи; грядово-мочажинные со сфагново-пушицевыми и сфагново-пушицево-шейхцериевыми мочажинами; грядово-мочажинные со сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцеригово-осоковыми, сфагново-осоково-очеретниковыми и сфагново-осоково-шейхцеригово-вахтовыми мочажинами; сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи с открытой водной поверхностью или сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцеригово-осоковыми, сфагново-осоково-очеретниковыми или сфагново-осоково-шейхцеригово-вахтовыми мочажинами с открытой водной поверхностью) наблюдается четко выраженный максимум значений яркости. Для облесенных микроландшафтов (сосново-сфагново-кустарничковые, сфагново-кустарничково-сосновые и сфагново-кустарничково-сосновые с обилием лишайника) наблюдается значительное повышение значений яркости. Именно эта зона способна обеспечить уверенное разделение основных групп микроландшафтов по облесенности участков.

В 5-й, средней инфракрасной зоне (1,55–1,75 мкм) наблюдается максимальное увеличение яркости для облесенных микроландшафтов, а для малооблесенных и необлесенных микроландшафтов наблюдается значительное снижение значений яркости, кроме сфагново-пушицево-кустарничкового микроландшафта, редко облесенного сосной, с обилием сухостоя. Снижение значений яркости наблюдается и в 7-й зоне (2,09–

2,35 мкм), где отмечаются минимальные значения яркости для всех типов микроландшафтов.

Таким образом, для разделения основных типов болотных микроландшафтов по цвету в цветовом синтезе должны участвовать ближний и средний ИК каналы спектра.

От того, с каким фильтром – красным, зеленым или голубым – участвуют в синтезе коротковолновые и длинноволновые зоны, зависит цвет изображения различных болотных микроландшафтов. При использовании красного фильтра для 4-й зоны, зеленого для 5-й зоны и голубого для 3-й зоны сфагново-кустарничково-сосновые микроландшафты изображаются светло-зеленым цветом, сосново-сфагново-кустарничковые микроландшафты – темно-зеленым цветом, грядово-мочажинные микроландшафты – розовыми и фиолетовыми оттенками, сфагново-осоковые и сфагново-осоково-пушицевые – белесыми бледно-розовыми или белесыми бледно-фиолетовыми оттенками, а сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи – красно-оранжевым цветом. Хорошо отображаются промышленно освоенные территории и дороги, которые в данном варианте синтеза изобразились голубым цветом, гидрографическая сеть – черным цветом. Такой вариант синтеза (рис. 1.25 (б), см. цв. вкладку), по нашему мнению, наиболее информативен и рекомендуется нами для визуального дешифрирования болотных массивов, так как цветовое разделение основных типов микроландшафтов здесь обеспечивается достаточно хорошо по сравнению с другими вариантами синтеза.

В других вариантах синтеза при использовании этих 3 зон цветовое разделение основных типов болотных ландшафтов также обеспечивается достаточно хорошо, но цвет их изображения не вполне удобен для восприятия снимка и работы с ним. Три варианта светового синтеза с использованием 3, 4, 5 каналов съемки ETM+/Landsat 7 приведены на рис. 1.25 (см. цв. вкладку).

Методы, основанные на анализе пространственных характеристик

В то время как спектральные улучшения осуществляют с помощью функций, выполняющих преобразование многозональных значений каждого пиксела индивидуально, пространственные предназначены для выделения или изменения пространственной информации в изображении, полученном в ДЗ. Они рассматривают значение каждого пиксела как двумерную функцию, оперируя для его модификации значениями соседних, окружающих пикселей, и выполняют преобразования сразу во всех зонах спектра.

Это позволяет решать целый ряд задач по улучшению изображений, связанных с фильтрацией, в процессе которой избыточная для решения определенной задачи информация отсеивается, а необходимая приводится к виду, упрощающему ее использование. Этот вид преобразований применяется для подчеркивания контуров, выделения линейных элементов определенной ориентировки, выявления изменений изображения на серии

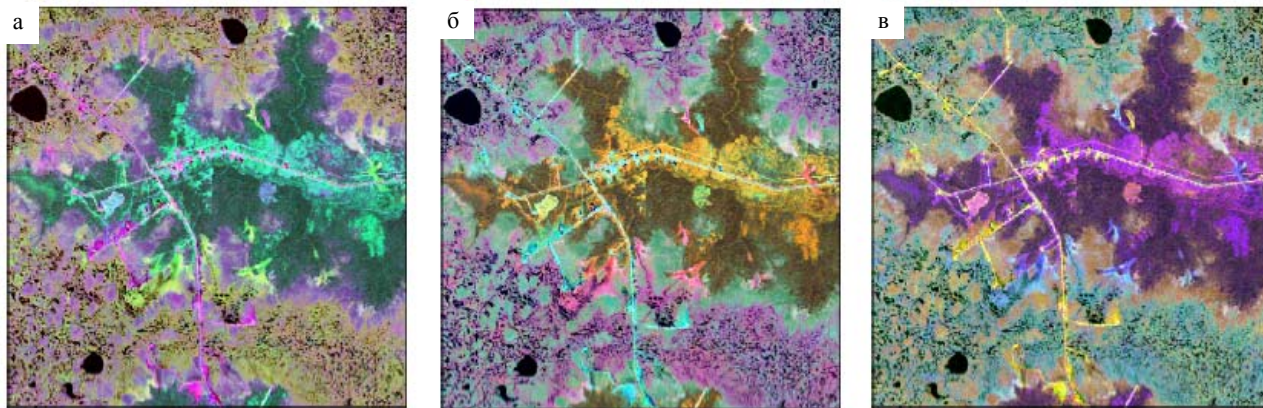


Рис. 1.25. Фрагменты многозонального космического снимка ETM+/Landsat 7 в трех вариантах цветового синтеза:

а) 1 вариант цветового синтеза (RGB – 3, 4, 5 зоны съемки); б) 2 вариант цветового синтеза (RGB – 4, 5, 3 зоны съемки), в) 3 вариант цветового синтеза (RGB – 5, 3, 4 зоны съемки).

снимков, а также для ликвидации различного рода помех на изображении, уменьшения влияния атмосферной дымки и т.д.

Наибольшее распространение получили два компьютерных способа фильтрации /104/: изменение яркости в скользящем окне и преобразование Фурье, анализирующее общую пространственную структуру всего изображения.

Базовой операцией пространственных преобразований является анализ информации в пределах скользящего по изображению окна, представляющего собой матрицу размером 3×3 пиксела, 5×5 и т.п. Операцию применяют к пикселу, находящемуся в центре окна. Его значение пересчитывается с использованием заданной функции от значений окружающих ближайших соседей. Затем окно сдвигается на один пиксел вдоль строки изображения до достижения ее конца, после чего смещают окно на одну строку.

В математике такая операция известна как свертка (convolution), а матрица – скользящее окно – как ядро свертки (kernel of convolution). При цифровой обработке изображений эта операция реализует разные приемы фильтрации яркостей изображения, которая представляет собой процесс взвешенного усреднения пикселей в некотором окне. Фильтрация – пространственный термин, относящийся к изменению пространственных и спектральных (пространственно-частотных) характеристик объектов для улучшения изображения /89, 93, 95/, поэтому матричную функцию (ядро свертки), применяемую в скользящем окне, называют также фильтром /110/.

Процедура пространственного улучшения имеет дело в основном с пространственной частотой (Spatial Frequency), представляющей собой разницу между наибольшим и наиболее низким значениями смежных наборов пикселей. Ее еще определяют как число изменений значений яркости на единицу расстояния в любой заданной части изображения /93/. Иными словами, это частота появления пиксела с определенными значениями спектральных характеристик на некотором участке изображения. Резкое изменение яркости изображения на участке в несколько пикселей рассматривается как высокая частота, плавное изменение на достаточно большом участке – как низкая пространственная частота.

Разным объектам изображения, таким, как леса, болота, дороги, поля, засеянные различными культурами, и т.д., присущи свои определенные особенности цвета и текстуры, что обуславливает различия в значениях пространственной частоты. Изображения обычно имеют участки как с низкой, так и высокой пространственной частотой. Глаз человека хорошо различает объекты с высокой пространственной частотой и высоким контрастом. Методы фильтрации и направлены на такие преобразования изображений, чтобы объекты на нем были четко различимы глазом.

В большинстве пакетов программ обработки изображений используют следующие фильтры (в скобках указаны их английская транскрипция и рекомендуемые размеры) /110/:

- низкочастотный (Low Pass, 3×3 , 5×5 , 7×7);
- медианный (Median, 3×3 , 5×5);
- адаптивный (Adaptive Box, 3×3 , 5×5 , 7×7);
- модальный (Mode, 3×3 , 5×5 , 7×7);
- высокочастотный (High Pass, 3×3);
- оператор лапласиана (Laplacian, 3×3 , 5×5 , 7×7);
- оператор Собеля (Sobel Edge Detector, 3×3);
- определяемый пользователем (User-Defined, 3×3);
- определяемый пользователем в виде файла (User-Defined Filter File,

размер до 255×255).

Низкочастотный фильтр обычно используют для генерализации или сглаживания изображения. Он подчеркивает постепенные (фоновые) низкочастотные изменения яркости и фильтрует более высокие частоты, соответствующие шуму или мелким деталям [117]. Представляющий интерес пиксел (соответствующий центру окна) заменяется арифметическим средним всех значений в пределах окна. Однако усреднение приводит к потере деталей изображения, что служит аргументом в использовании окна малого размера. На рис. 1.26.2 (см. цв. вкладку) приведен пример использования такого фильтра для болотного массива исходного изображения 1.26.1 (см. цв. вкладку), где изображения микроландшафтов имеют сглаженный вид и нет четкости изображения.

Медианный, адаптивный и модальный фильтры являются статистическими. В этих способах матрица фильтра не создается. Значение пиксела в центре окна заменяется числом, определенным путем анализа распределения значений в окне – табличного представления гистограммы.

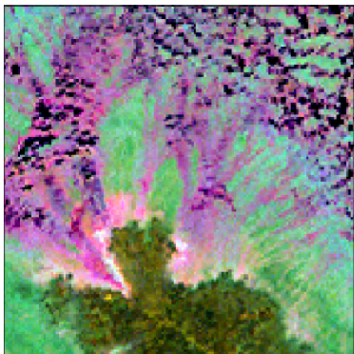
Если все значения пикселей в окне расположить в возрастающей или убывающей последовательности, то в результате применения медианного фильтра значение пиксела, стоящее в середине упорядоченной последовательности (из 9, 25 или другого нечетного числа исходных значений), присваивается центральному пикселу окна. Операция медианного фильтра имеет эффект исключения пиксела, имеющего нетипичное статистическое значение в локальной окрестности (локальный шум) [110].

В адаптивном фильтре в пределах окна вычисляется стандартное отклонение значений яркости пикселей от значения в центральном пикселе. Яркость в центральном пикселе заменяется нулем, если стандартное отклонение ниже заданного пользователем порога, и средним из значений остальных пикселей, если отклонение выше.

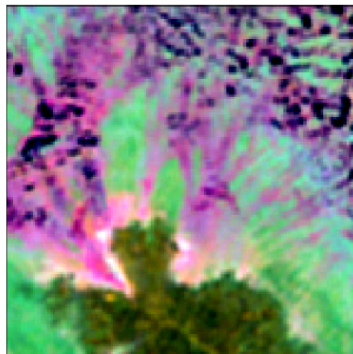
В модальном фильтре значение пиксела в центре окна заменяется более часто встречающимся в пределах окна значением (соответствующим пику или моде гистограммы).

К этой группе методов фильтрации относят способ, в котором центральному пикселу присваивается минимальное или максимальное значение яркости в окне.

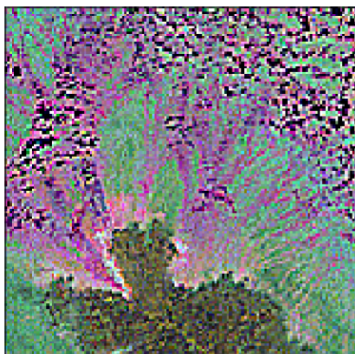
Статистические фильтры используют для подавления случайных шумов на любом изображении с сохранением границ объектов. Примером



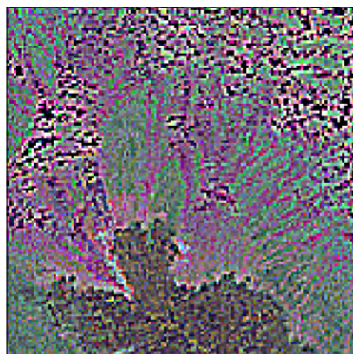
1.26.1. Исходное изображение



1.26.2. Низкочастотная фильтрация



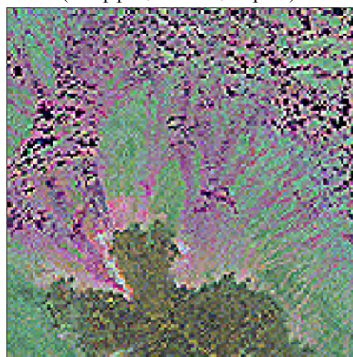
1.26.3. Высокочастотная фильтрация
(коэффициент в центре 11)



1.26.4. Высокочастотная фильтрация
(коэффициент в центре 9)



1.26.5. Crisp-фильтр



1.26.6. Фильтр «оператор лапласиана»

Рис. 1.26. Примеры фильтрационных преобразований (с размером 3×3 пиксела) фрагмента болотного массива

применения медианного фильтра является удаление полосчатости на изображении, полученном при сбое в работе какого-либо детектора.

Высокочастотные фильтры применяют, чтобы удалить медленно меняющиеся значения и подчеркнуть локальные высокочастотные изменения, выделить области резких переходов на фоне постепенных изменений. Это могут быть фильтры с нулевой суммой коэффициентов, которые приводят к получению выходных значений /110/:

- равных нулю в областях, где исходные значения равны (нет границ);
- низких в областях низкой пространственной частоты;
- экстремальных (когда высокие значения становятся гораздо выше, а низкие – еще ниже) в областях высокой пространственной частоты.

Коэффициенты такого фильтра, например, для окна 3×3, таковы: 9 в центре и –1 – все остальные (по умолчанию в ERDAS Imagine). Для подчеркивания граничных значений (резких переходов в значениях яркости) экспериментально увеличивают значение в центре (10, 11 и т.д.). Так, самым оптимальным, по нашему мнению, является коэффициент фильтра для окна 3×3: 11 в центре и –1 для всех остальных. Результат такой фильтрации показан на рис. 1.26.3 (см. цв. вкладку), где наблюдается повышение четкости микроландшафтов линейного расположения (полос стока), расходящихся от центральных частей болот по направлению к окраинам болот, таких, как при сохранении общего фона окружающих микроландшафтов удобном для визуального восприятия, что немало важно. Этот фильтр можно применять для более уверенного построения генерализованной сетки линий стекания болотных вод. При использовании фильтра с коэффициентом 9 в центре наблюдается аналогичная картина, но общий фон микроландшафтов приобретает очень пеструю структуру, что затрудняет их визуальное дешифрирование (см. рис. 1.26.4, см. цв. вкладку).

В отличие от фильтров-детекторов граничных значений, которые будут рассмотрены ниже, высокочастотные фильтры подчеркивают или выделяют контуры, но не обязательно исключают значения других пикселей объектов. При применении такого фильтра к набору пикселей с относительно низким значением в окружении более высоких значений низкое значение становится ниже, и наоборот, при использовании фильтра для набора пикселей с относительно высоким значением в окружении более низких значений высокое значение становится выше. В любом случае пространственная частота повышается.

Разновидность высокочастотных фильтров – crisp-фильтры – применяют для увеличения яркости всего снимка (повышения резкости), не нарушая ее общей изменчивости. Такие методы полезны в случае затененности и неясности изображения из-за атмосферной дымки, быстрого перемещения датчика, а также для изображений, преобразованных методом главных компонент – для его первой компоненты /118/. Таким образом, преобразование действует так, что яркость снимка возрастает, а изменчивость сохраняется (см. рис. 1.26.5, см. цв. вкладку).

Выделение границ и линейных объектов является важной операцией в обработке цифровых изображений. Например, для геологов представляет интерес картографирование характерных линеаментов, которые могут соответствовать линиям разломов или разного рода подстилающим структурам. Для этих целей выделение границ и линий является основной техникой улучшения изображений. В растровом представлении нет четких границ, и отсюда необходимость в алгоритмах нахождения их местоположения и подчеркивания.

Алгоритмы выделения границ рассматривают изменения яркости на снимке как некоторую непрерывную функцию и используют операции с производными 1-го и 2-го порядка. При переходе через линейный объект или контур яркости меняются скачкообразно или принимают экстремальное значение. Известно, что если функция в некоторой точке имеет скачок, то в этой точке ее первая производная максимальна по абсолютной величине, если же функция имеет в точке экстремум, то ее первая производная равна нулю, а вторая максимальна. Для дискретизированных снимков значения производных, вычисленных вдоль строк или столбцов – это, соответственно, разности или разности разностей значений яркости двух соседних пикселей /110/.

Методы, использующие операторы *лапласиана* и *Собеля*, предназначены для выделения линейных объектов и контуров на изображении.

Оператор лапласиана основан на вычислении вторых производных и обеспечивает выделение линий и контуров в разных направлениях. Примером лапласиана служит фильтр с размером скользящего окна 3×3 пиксела с положительным весом в центре 5, нулевыми значениями по углам и значениями –1 в центре каждой стороны. Оператор Собеля использует нелинейные комбинации пикселей. Использование такого оператора лапласиана показано на рис. 1.26.6 (см. цв. вкладку), который так же, как высокочастотный фильтр (с коэффициентом 11 в центре), дает увеличение четкости линейных микроландшафтов при сохранении общего фона окружающих микроландшафтов, удобным для визуального восприятия.

Пространственное улучшение изображений путем объединения разрешений (синергизм снимков) – это слияние различных изображений, приведенных к единой системе координат, например сканерных снимков в видимом диапазоне и радиолокационных снимков. Наиболее широко применяется синергизм панхроматического изображения высокого разрешения с цветным синтезированным (многозональным) изображением более низкого разрешения. В ходе преобразования пиксела панхроматического снимка придается цвет. При этом создается новый многозональный снимок с таким же количеством пикселей, как на панхроматическом снимке, и, следовательно, с таким же пространственным разрешением, но позволяющий иметь цветное синтезированное изображение. Если участки электромагнитного спектра, охватываемые многозональным и панхроматическим снимками совпадают, то цветовая гамма

нового изображения практически соответствует исходному многозональному /104/.

Так, снимки, получаемые системой Ландсат ТМ, имеют в шести зонах высокое спектральное разрешение с пространственным разрешением 30 м.

Панхроматический снимок SPOT имеет один широкий спектральный диапазон с пространственным разрешением 10 м. Рассматриваемый метод пространственного улучшения реализует комбинирование этих двух изображений с целью получения шестизонального набора данных с пространственным разрешением 10 м так, чтобы новое изображение соответствовало наилучшим характеристикам обоих датчиков.

Предложен ряд моделей объединения разрешений для получения такого изображения. Первоначально во всех моделях выполняется трансформирование изображения с низким пространственным разрешением в систему строк и столбцов изображения с высоким разрешением – размеры их пикселей становятся равными. Для трансформирования используется один из методов, описанных ранее. Далее в большинстве моделей используют преобразование снимков с более высоким спектральным разрешением методом главных компонент /110, 118/. Затем выполняется RGB-синтез изображения с высоким пространственным разрешением со второй и третьей компонентами. В приведенном выше примере предполагается, что первая главная компонента (1 ГК) эквивалентна панхроматическому изображению SPOT, поскольку в ней яркость и контраст максимально подчеркнуты и она схожа по изобразительным свойствам со снимком в видимой зоне спектра. Вся информация, относящаяся к специфике спектральной информации, содержится в других компонентах. Следует отметить, что спектральные свойства панхроматического снимка не распространяются на ближнюю ИК зону, что приводит к ошибкам в отображении границ растительность – почва на новом изображении. Для объединения изображений необходимо, чтобы они были радиометрически подобны.

Так, на рис. 1.27 (см. цв. вкладку) продемонстрирован синергизм панхроматического изображения ETM+/Landsat 7 с пространственным разрешением 15, с многозональным изображением ETM+/Landsat 7 (1–6, 7 зоны) с пространственным разрешением 30. Новое изображение, полученное в результате их объединения, имеет шестизональный набор данных с пространственным разрешением 15 м и цветовую гамму, близкую к исходному многозональному. На этом изображении мы видим, что четкость микроландшафтов значительно повысилась, особенно линейно-протяженных микроландшафтов. Также хорошо стали различаться микроозерки и озера, техногенные объекты, что позволяет более детально их дешифровать. Но следует заметить, что спектральные свойства панхроматического снимка (0,52–0,9 мкм, соответствующие 2, 3, 4 зонам многозонального снимка) не распространяются на средние ИК зоны многозонального снимка [5 (1,55–1,75 мкм) и 7 (2,09–2,35 мкм)], которые важны для оценки обводненности болотных микроландшафтов.

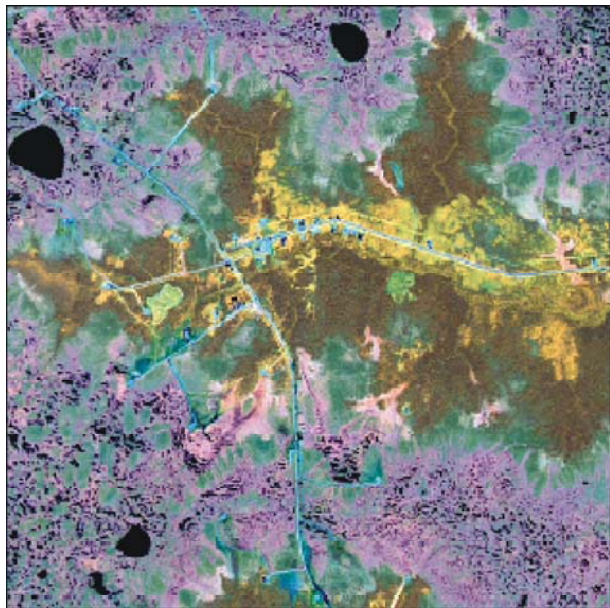


Рис. 1.27. Результат слияния снимков ETM+/Landsat 7

Преобразование Фурье

В фильтрации снимков есть альтернатива операторам скользящего окна, работающим в системе пространственных координат (x, y) – это использование спектра частот функций вариации яркости. Одним из наиболее распространенных методов получения частотных спектров для дискретных цифровых снимков является быстрое преобразование Фурье /110/.

Для визуального анализа полученного спектра частот используют так называемую диаграмму амплитуд (магнитуд) функций. На этой диаграмме функции с низкими частотами отображаются точками в центре диаграммы, а с возрастанием частот соответствующие им точки отстоят все дальше от центра.

Преобразования Фурье обычно применяют для удаления шумов, таких, как полосчатость, крапины или вибрация изображения, посредством выявления периодичности их проявления (областей высокой пространственной частоты) /93, 119/. Методика применения преобразования Фурье для удаления полосчатости изображения, полученного системой Ландсат MSS на район Мончегорска, изложена в монографии /120/.

В теории обработки изображений развиваются также вейвлет-преобразования (от англ. *wavelet* – небольшая волна), направленные на фильтрацию снимков на основе выделения в них компонент разного масштаба и детальности (что достигается сочетанием различных фильтров на основе скользящего окна и выборочного использования строк и столбцов снимка). В настоящее время перспективна фильтрация снимков на основе теории фракталов и другие /104/.

Исследование текстуры. Обычно на изображениях природных объектов отсутствуют резко выраженные яркостные границы, а разные объекты отличаются плотностью схожих комбинаций яркостей пикселей, создающих текстуру изображения. Измерения текстуры изображения можно использовать для его сегментирования и классификации сегментов. Хотя текстура – типично качественная характеристика, ее можно выделить с помощью математических операций. Чаще всего применяют четыре алгоритма для изучения текстуры, которые основаны на анализе статистических характеристик распределения значений яркости в скользящем окне /110/:

- среднее евклидово расстояние от центрального пикселя окна до всех остальных пикселей, вычисляемое по всем зонам снимка;
- вариация или квадрат показателя стандартного отклонения значений яркости в окне, служащая показателем неоднородности исходных данных;
- асимметрия, характеризующая асимметричность гистограммы распределения данных относительно ее максимума (пика);
- эксцесс, определяющий остроту пика гистограммы по сравнению с нормальным распределением.

Перечисленные показатели хорошо идентифицируют пиксели, значения, яркости которых отличаются от преобладающего распределения в

окне, что и позволяет выделять текстуру. Для ее анализа используют разные сочетания показателей. Так, среднее значение, вариация и эксцесс характеризуют объекты с однородной зернистой текстурой, например леса. Другое сочетание – среднее значение, вариация и асимметрия характеризует текстуру, заложенную в статистику пространственной разности яркостей, выделяя вытянутые или линейные текстуры /110/.

Однако использование только текстурных показателей для дистанционной классификации объектов является недостаточным. Для проведения классификаций обычно совместно используют как текстурные, так и яркостные спектральные показатели. Одним из основных факторов к анализу текстурных показателей является пространственное разрешение дешифрируемых КС. Так, в статье /121/ рассматривается классификация типов лесов с использованием текстурных показателей, в заключении делается вывод, что использование КС Landsat 7 с пространственным разрешением 30 м является недостаточным для дешифрирования текстурных признаков типов лесов, обусловленных периодической структурой лесного насаждения. В нашем случае дешифрирование текстурных признаков микроландшафтов болотных массивов по данным ETM+/Landsat 7 тоже не дает положительных результатов.

Создание простых производных индексных изображений. Так называемые *индексные изображения*, в которых яркость каждого пиксела определяют на основе индексов. Принцип расчета индексных изображений обусловлен тем, что при изучении объектов по многозональным снимкам часто важны не абсолютные значения, а характерные соотношения между значениями яркости объекта в спектральных зонах. Индексные изображения получают путем простых преобразований снимков на основе арифметических операций со значениями яркости в различных спектральных зонах (их сложения, вычитания, деления, умножения). Они могут быть простыми, такими, как разности двух зон, или более сложными, использующими построение функций от значений в нескольких зонах. Преобразования выполняют для каждого пиксела снимка, после чего имеют дело либо с одним цветным изображением нового признака, либо с несколькими, число которых меньше числа зон. Такие методы направлены на подчеркивание спектральных различий объектов, изобразившихся на снимке, что, в свою очередь, способствует повышению достоверности их дешифрирования как визуального, так и последующего автоматизированного.

Расчет индексов направлен на создание производных признаков – характеристик спектрального контраста между зонами, которые отражают форму кривых спектрального образа. Они достаточно инвариантны к условиям наблюдения по сравнению с абсолютными значениями спектральных яркостей и позволяют для анализа классов объектов использовать некалиброванные значения яркости на исходном снимке (например, без учета влияния атмосферных условий съемки). Наиболее широко производные признаки используют при анализе растительного покрова.

К ним относят, прежде всего, признаки, учитывающие характерные различия спектральных яркостей растительных объектов в красной и ближней инфракрасной зонах – вегетационный индекс VI (Vegetation Index) и нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalised Difference Vegetation Index).

Вегетационный индекс – это простое зональное отношение $VI = B_{ик}/B_{к}$ ($B_{ик}$ и $B_{к}$ – яркости в красной и ближней инфракрасной зонах) наиболее чувствительно к присутствию растительности, отражает различия яркости растительных и нерастительных объектов, представляет индикатор сомкнутости растительного покрова, но является функцией времени.

Несмотря на достоинства индекса VI, чаще на практике используют **нормализованный разностный вегетационный индекс** $NDVI = (B_{ик} - B_{к}) / (B_{ик} + B_{к})$.

Для водных объектов он принимает отрицательные значения; для почв, грунтов, сухой растительности близок к нулю; максимальные значения принимает для вегетирующей растительности и промежуточные – для разных состояний растительного покрова. NDVI подчеркивает контраст обнаженных пород и почв с зеленой растительностью, способствует выделению типов и состояния растительных объектов. Его значения возрастают с развитием зеленой биомассы и уменьшаются с ее усыханием. В то же время одни и те же значения вегетационного индекса могут соответствовать экологически различным категориям естественной и культурной растительности. Вегетационный индекс нашел широкое применение при исследованиях в глобальном масштабе, например, для изучения распределения фитопланктона в Мировом океане, для определения сроков и скорости прохождения «зеленой волны» весной. На локальном уровне индекс чаще используется при картографировании или оценке состояния культурной и естественной растительности /109/.

При выполнении практических исследований по снимкам создают модифицированные NDVI.

Например, известный как трансформированный NDVI (TNDVI) реализуется соотношением $TNDVI = \sqrt{((B_{ик} - B_{к}) / (B_{ик} + B_{к})) + 0,5}$, в котором добавление слагаемого 0,5 автоматически предотвращает получение отрицательных значений под корнем для большинства получаемых изображений /110/. Существуют десятки других вегетационных индексов. Часть их них – это модификация вышеперечисленных (в том числе с использованием других спектральных зон), а часть – более сложные индексы, основанные на биофизическом моделировании и калибровке по наземным данным, например индекс листовой поверхности LAI (Leaf Area Index) и др.

Специфические отношения зональных значений снимков, полученных системой ETM+/Landsat 7, используют в геологических исследованиях. Например, отношение B_3/B_4 позволяет идентифицировать соединения закиси железа, B_3/B_1 – окиси железа. Синтезирование изображений, полу-

ченных с помощью этих отношений, позволяет идентифицировать смеси минералов, а отношений B_5/B_7 , B_3/B_1 , B_4/B_3 – залежи гидротермального происхождения /110/.

Известны и другие, более сложные преобразования многозональных снимков, например преобразование «*шапочка с кисточкой*» (более известное как *Tasseled Cap* /92–95/ или преобразование Томаса-Каута), получило такое название по виду его графика /110/.

Оно использует для идентификации растительности более сложную комбинацию не менее чем из шести зон. Метод основан на подборе осей координат пространства спектральных признаков, позволяющем оптимально отобразить различия растительности. Значения спектральной яркости растительности разных типов, находящейся на различных стадиях роста, занимают треугольную область в двумерном пространстве спектральных признаков. Эта область расположена с наклоном по отношению к осям графика соотношения спектральных яркостей, поэтому ни по одной из осей не отображается максимальный диапазон изменения спектральных свойств растительности. Если оси координат развернуть таким образом, чтобы одна из них шла параллельно линии почв, а вторая располагалась ортогонально, то вдоль каждой из осей диапазон значений будет максимальным, что увеличит возможности дешифрирования снимка.

Для определения положения линии почв первоначально использовались эталонные участки почв в США. По ним для сканерных снимков со спутников *Landsat* были рассчитаны и опубликованы /95/ коэффициенты разворота для перехода к новым осям. Причем использовали не две, а все спектральные зоны снимков в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, чтобы наиболее полно охарактеризовать отражательные свойства растительности. Выполняя преобразование Томаса-Каута, спектральные яркости умножают на зональные коэффициенты разворота, и эти произведения складывают, получая новую спектральную характеристику. Так, вначале рассчитывают новое изображение для оси, параллельной линии почв, затем с другими коэффициентами разворота – для ортогональной оси и т.п., формируя многослойное производное изображение.

Наиболее важными оказались первые три оси пространства характеристик растительности: для снимков *Landsat*TM изображение для оси, параллельной линии почв, интерпретируют как «яркость», для оси, ортогональной к ней, – как «зеленость» (она соответствует контрасту между значениями в видимых и ближней инфракрасной зоне), а для третьей оси – как «влагосодержание» растительности. При синтезе этих характеристик получают цветное изображение, хорошо отображающее свойства растительного покрова. На рис. 1.28 (см. цв. вкладку) показан преобразованный снимок по методу Томаса-Каута, который сделан в *ERDAS Imagine*.

На преобразованном снимке коричневыми и темно-коричневыми тонами выделились лесные и мохово-лесные типы болотных микроландшафтов, красным – кустовые площадки, дороги, промзоны, карьеры и техно-

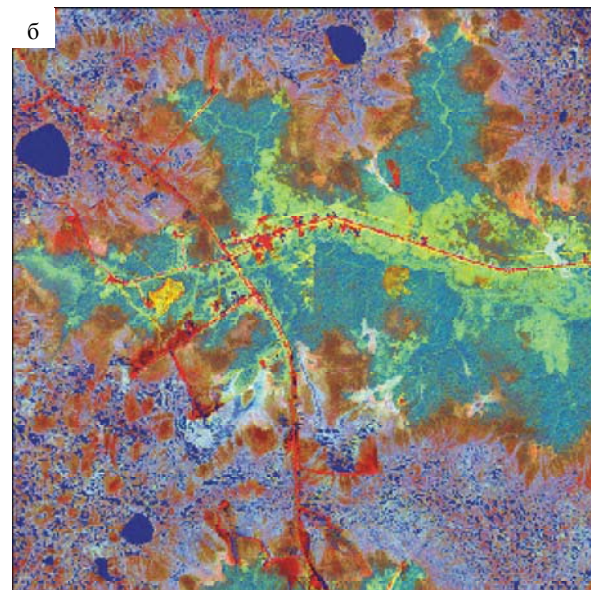
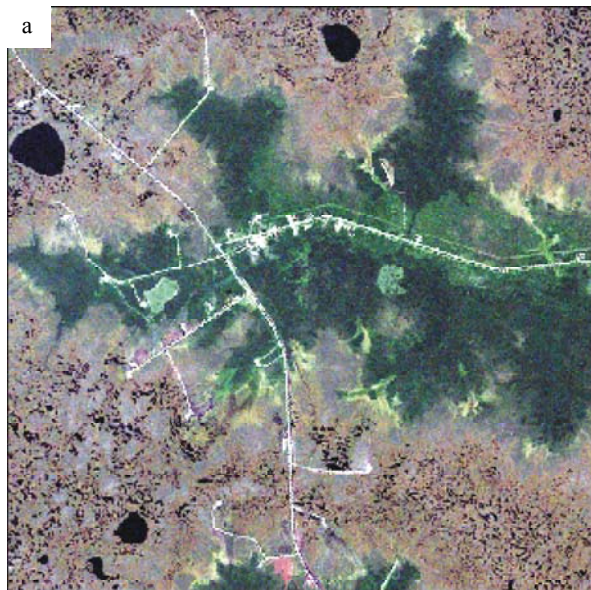


Рис. 1.28. Преобразование по методу Томаса-Каута для отображения характеристик растительности:

а) исходный снимок в естественных цветах; б) после преобразования компоненты «яркости», «зелености» и «влажносодержания», синтезированные в сочетании RGB.

генные пустоши, светло-фиолетовыми – грядово-мочажинные и грядово-мочажинно-озерковые комплексные микроландшафты, светло-розовыми и голубыми – мохово-травяные типы, синим – озера, микроозерки и микроландшафты с открытой водной поверхностью, сине-зеленым, зеленым, желто-оранжевым – лесная растительность и возобновляющиеся мелколиственным лесом гари и вырубки.

Поскольку свойства почв, растительности и влажности напрямую зависят от особенностей природных зон, невозможно использование стандартных линейных комбинаций зональных снимков, даже получаемых одной съемочной системой, без сравнения с наземными данными по исследуемому району. Поэтому такие комбинации носят эмпирический характер. Так, например, в работе /95/ приведены эмпирические комбинации зональных снимков, получаемых системой Ландсат ТМ для сельскохозяйственных территорий Среднего Запада США.

Дальнейшие исследования позволили создать еще три новых производных признака с использованием информации всех имеющихся зон съемочных систем Ландсат MSS и ТМ, названные *haze* (дымка, для MSS его называли *yellow stuff*), *TC5* и *TC6* (пятый и шестой признаки преобразования Томаса-Каута) /95/. Эти признаки введены для отражения влияния атмосферной дымки на отражательную способность почв и растительности и предназначены для выполнения калибровки снимков. Например, признак «дымка» использовался в алгоритме «разтуманивания» изображений, полученных системами Ландсат ТМ /110/.

Преобразование по методу главных компонент (ГК) имеет более универсальное назначение – это оптимизация изображения для дешифрирования всех типов объектов, изобразившихся на многозональном снимке. При этом, подобно преобразованию Томаса-Каута, осуществляется разворот осей в пространстве спектральных признаков, но не на основе опытных данных, а по параметрам, извлеченным из самого изображения. Для этого на компьютере предварительно строятся графики распределения значений яркости снимка в многомерном пространстве спектральных признаков. Первая из новых осей, или главных компонент, проводится в направлении наибольшего разброса значений яркости, вторая – ортогонально ей, третья – ортогонально первым двум и т.д. Если область, в которой на графике сконцентрированы значения яркости снимка, сильно вытянута в одном направлении, то первая главная компонента вберет в себя основную часть яркостных различий снимка, т.е. позволит более экономно описать имеющуюся в нем информацию. Такое расположение значений яркости характерно для большинства природных объектов: растительности, почв, горных пород. Оно означает, что значения яркости этих объектов согласованно меняются в разных спектральных зонах, например у почв последовательно растут с увеличением длины волны. В математике это соответствует понятиям ковариации и коэффициента корреляции /104/.

Спектральные зоны многозонального КС зачастую сильно коррелируют друг с другом. Многозональные снимки участков, покрытых расти-

тельностью, имеют отрицательные корреляции между ближней ИК и красной областями спектра и положительные корреляции между всеми зонами видимого спектра. Это связано с тем, что по мере того, как количество зеленой биомассы на единицу площади увеличивается, спектральная отражательная способность в красном диапазоне падает, а в ближней ИК области растет. Наличие корреляции между зонами многозонального изображения показывает, что в данных существует избыточность, т.е. часть информации повторяется /122/.

Поскольку ни одна из рассчитанных главных компонент не коррелирует с другими, каждая компонента несет в себе новую информацию. И поскольку они упорядочены по количеству информации, первые несколько компонент обычно содержат максимальную долю реальной информации из набора спектральных зон. Собственные значения преобразования показывают количество дисперсии, обусловленное каждой компонентой (содержащееся в ней), а координаты собственных векторов являются коэффициентами уравнений преобразования. Иными словами, эти параметры определяют длины и направления осей главных компонент в пределах «эллипсоида рассеяния», который статистически описывает разброс значений яркости многозонального снимка. Главные компоненты снимка обычно имеют больший контраст, чем исходные спектральные каналы /117/.

Преобразование по методу главных компонент имеет три основные области применения. Во-первых, если в снимке более трех спектральных зон, это позволяет сжать почти всю их информацию в цветное синтезированное изображение первых трех главных компонент, пригодное для визуального дешифрирования и для классификации, так как они обычно содержат до 98–99% вариаций значений яркости исходного снимка. Этот подход целесообразен в случае, когда близость спектральных яркостей в исходных спектральных зонах затрудняет различение похожих объектов, а также когда важно использовать минимум дискового пространства для хранения снимка. Во-вторых, некоторые объекты малого размера и низкого контраста, плохо дешифрируемые на исходных снимках, выявляются на изображениях отдельных спектральных компонент. Этот подход используют, например, в геологоразведке, пытаясь выявить по снимку необычные минеральные проявления. В-третьих, такое преобразование проводят для серии разновременных снимков приведенных в единую систему координат, для выявления динамики, которая часто ярко проявляется в одной или двух компонентах.

При дешифрировании изображений главных компонент следует учитывать два их недостатка. Так, они рассчитываются на основе разброса значений яркости конкретных снимков, и результирующие производные изображения нельзя сравнивать с полученными тем же методом по другим снимкам. К тому же цвета на цветном синтезированном изображении главных компонент несопоставимы с физическими характеристиками объектов и для их интерпретации надо использовать исходный многозональный снимок /104/.

Так, при преобразовании исходного снимка ETM+/Landsat 7 с использованием пакета ERDAS Imagine этот метод позволяет получить по шести исходным зонам снимка шесть новых изображений, ранжированных по убыванию дисперсии (спектрального контраста). При этом в первом изображении (первой главной компоненте) такой контраст максимально подчеркнут. Второе изображает контуры, на которых происходит смена контраста. Изображения, соответствующие остальным компонентам, содержат в основном информацию о различных шумах и систематических погрешностях съемочной системы /123/.

На рис. 1.29 (см. цв. вкладку) представлен преобразованный снимок по методу главных компонент, где 1 ГК соответствует красной зоне (red), 2 ГК – зеленой зоне (green) и 3 ГК – голубой зоне (blue) синтезированного снимка.

Статистические характеристики исходных снимков и полученные в процессе обработки снимка модулем Principal Components приведены в табл. 1.3–1.7. Процент выявленной дисперсии показывает, что в первых трех компонентах сосредоточено 98,5% информации всего изображения. Это позволяет почти без потерь информации перейти от шести изображений к трем.

Для расчета корреляции между данной ГК и каждой из зон исходного многозонального снимка (факторной нагрузки) значения собственных векторов умножают на корень из соответствующего собственного значения и делят на корень из дисперсии соответствующей зоны съемки. Эти корреляции показывают, сколько каждая исходная зона вносит в каждую главную компоненту. Чем больше значения факторной нагрузки по модулю, тем больше данная зона вносит вклад в данную ГК. В нашем случае (табл. 1.7), 5-я зона вносит наибольший вклад в 1 ГК, 4-я – в 2 ГК и 3-я зона – в 3 ГК.

Т а б л и ц а 1.3

Вариационно-ковариационная матрица снимка

	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5	Зона 7
Зона 1	13,80	15,90	25,64	21,22	36,41	24,67
Зона 2	15,90	27,89	39,45	52,42	62,55	38,31
Зона 3	25,64	39,45	72,72	63,19	78,29	53,84
Зона 4	21,22	52,42	63,19	223,57	148,04	64,81
Зона 5	36,41	62,55	78,29	148,04	235,33	125,98
Зона 7	24,67	38,31	53,84	64,81	125,98	77,94

Т а б л и ц а 1.4

Дисперсия спектральных зон снимка

Зона	1	2	3	4	5	7
Дисперсия	13,80	27,89	72,72	223,57	235,33	77,94

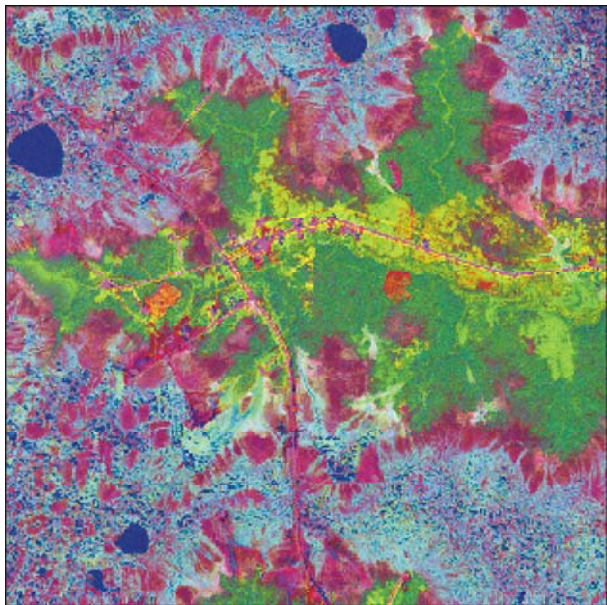


Рис. 1.29. Синтез главных компонент 1-2-3

Т а б л и ц а 1.5

Матрица собственных векторов

	1 ГК	2 ГК	3 ГК	4 ГК	5 ГК	6 ГК
Зона 1	0,11	-0,13	0,23	0,61	0,61	0,42
Зона 2	0,21	-0,06	0,28	0,38	0,05	-0,85
Зона 3	0,28	-0,16	0,80	-0,49	0,00	0,13
Зона 4	0,56	0,81	0,00	0,07	-0,08	0,11
Зона 5	0,65	-0,38	-0,47	-0,30	0,33	-0,08
Зона 7	0,35	-0,39	0,00	0,39	-0,72	0,25

Т а б л и ц а 1.6

Собственные значения и процент общей дисперсии,
обусловленной каждой главной компонентой

ГК	Собственное значение	Процент общей дисперсии, %
1 ГК	490,62	75,33
2 ГК	103,23	15,85
3 ГК	47,76	7,33
4 ГК	4,12	0,63
5 ГК	3,19	0,49
6 ГК	2,34	0,36

Т а б л и ц а 1.7

Показатели факторной нагрузки каждой зоны снимка
на каждую компоненту

	1 ГК	2 ГК	3 ГК	4 ГК	5 ГК	6 ГК
Зона 1	0,685429	-0,346701	0,428933	0,332186	0,291997	0,174335
Зона 2	0,875364	-0,116341	0,371014	0,146436	0,017598	-0,246574
Зона 3	0,725294	-0,194663	0,649738	-0,115544	0,000846	0,023335
Зона 4	0,833860	0,551684	-0,001411	0,009974	-0,010058	0,010958
Зона 5	0,942069	-0,252994	-0,213073	-0,039256	0,038597	-0,008277
Зона 7	0,878809	-0,443451	0,001661	0,090788	-0,144803	0,042816

1.6.2. Методы автоматизированного дешифрирования многозональных снимков

Использование многозональных снимков для распознавания объектов основано на различиях в их спектральной отражательной способности, следствием которых являются не одинаковые яркостные характеристики на зональных снимках.

Совокупность значений яркости многозонального снимка может быть представлена как *пространство спектральных признаков*, размерность которого определяется числом съемочных зон (двумерное, трехмерное, n-мерное) /109/. Спектральная яркость природных объектов определяет уровень яркости их изображения на зональных снимках и, следовательно, положение в пространстве признаков.

Согласно теории распознавания образов, классификация объектов предполагает разделение пространства признаков на замкнутые области (классы) с определенными значениями признаков. Другими словами, в результате классификации каждый пиксел получает новое значение, входящее в заранее заданное дискретное множество, исходя из его первоначального значения, которое входило в непрерывное множество. Таким образом, классификация – это процесс преобразования непрерывного растрового изображения в тематическое, которое в результате может содержать такие классы, как, например, различные типы растительного покрова или ландшафтов. Область (класс) в пространстве спектральных признаков может быть компактной, когда характеристики пикселей данного класса мало различаются. Однако на практике чаще встречаются случаи, когда области признаков, относящиеся к разным классам, соприкасаются или частично перекрываются. Причина этого заключается в неоднородности объектов земной поверхности и их освещенности и усугубляется пиксельной структурой цифрового снимка. В каждом пикселе неоднородной поверхности яркости соседствующих объектов интегрируются в разных соотношениях, из-за чего и возникает большой разброс спектральных характеристик внутри одного класса.

Отнесение пикселей к классам зависит от принятого правила классификации. Возможны два подхода.

В первом из них классификация основана на признаках объектов, принадлежность которых к определенному классу на местности известна (например признаки объектов на эталонных участках). В этом случае выполняется контролируемая классификация, иногда называемая классификацией с обучением.

Другой подход заключается в группировке пикселей со сходными уровнями яркости в зонах без предварительного знания числа и характеристик классов объектов на местности. Это неконтролируемая классификация, или классификация без обучения.

В состав программного обеспечения автоматизированной обработки аэрокосмических снимков обычно входят несколько алгоритмов как контро-

лируемой, так и неконтролируемой классификации. Выбор рабочего алгоритма определяется наличием априорной информации, качеством используемого снимка, решаемой задачей, опытом и интуицией дешифровщика.

Для предварительной оценки потенциально возможного числа выделяемых кластеров может быть использован простой и быстрый метод, называемый RGB кластеризацией, реализованный, например, в пакете ERDAS Imagine /94/. RGB кластеризация является и методом классификации, и способом сжатия в одно восьмибитовое изображение трех восьмибитовых зональных изображений, представленных 24-битовыми данными. Алгоритм графически отображает все пиксели в трехмерном пространстве признаков и подразделяет это пространство на секции, которые затем используются для определения кластеров. Каждый кластер становится классом в выходном тематическом растровом слое, который удобен для визуального анализа /110/.

Неконтролируемая классификация

Смысл неконтролируемой классификации заключается в разделении всех пикселей изображения на группы (кластеры), название, спектральные характеристики и даже само существование которых *предварительно неизвестны*. Критерием отнесения пикселей к тому или другому кластеру служит схожесть спектральных характеристик. В задачу дешифровщика входит последующее определение соответствия выделенных кластеров классам земной поверхности, которое выполняется с использованием дополнительной информации – материалов наземных наблюдений, карт и т.д.

Способ быстрого выделения кластеров пригоден для быстрого выделения многозонального снимка на пространственно и спектрально однородные области. Центр (средние значения) первого кластера задается значениями яркости первого пиксела кластеризуемого изображения. Далее все изображение последовательно анализируется пиксел за пикселем по строкам или по столбцам и при необходимости образуются новые кластеры. В процессе анализа рассчитывается спектральное расстояние d от значений спектральной яркости текущего пиксела до средних значений яркости по кластеру. Решение, присоединить ли пиксел к кластеру или образовать новый, принимается в результате сопоставления вычисленного спектрального расстояния и специально заданного порога яркости. После образования второго кластера значения каждого последующего пиксела сравниваются уже с двумя наборами средних значений и т.п. После обработки всего снимка получают предварительную карту кластеризации, в легенде которой указаны порядковые номера кластеров. Далее дешифровщик определяет соответствие этих кластеров тематическим классам. Преимущество способа – высокая скорость вычислений, а недостаток – влияние значений яркости первых нескольких пикселей на результат кластеризации. Усовершенствованный вариант алгоритма быстрого выделения кластеров предполагает определение яркостных порогов в процессе кластеризации. Способ является параметрическим в том смысле, что пред-

полагает группировку пикселей вокруг средних значений яркости кластеров /104/.

Самоорганизующийся способ кластеризации ISODATA (от Iterative Self-Organising Data Analysis Technique – итеративный самоорганизующийся способ анализа данных) используют для более точной, многошаговой обработки снимков. Основной параметр, задаваемый перед вычислениями, – число кластеров n , которое необходимо получить. Задается порог сходимости, представляющий собой предельную (максимальную) величину доли пикселей изображения, не изменивших своего значения в данной итерации, при котором работа алгоритма прекращается. Обычно величина порога сходимости задается равной 0,95, это означает, что если в данной итерации 95% пикселей не изменили своего значения, работа алгоритма прекращается. Также на тот случай, если вследствие спектральной структуры данных порог сходимости не может быть достигнут (из-за циклического переназначения значений пикселей или других причин), задается максимальное число итераций.

Перед первой итерацией рассчитывают статистические параметры распределения яркости всего снимка в каждой спектральной зоне: минимальное, максимальное и среднее значения, стандартное отклонение. Далее все пространство спектральных признаков делят на n равных диапазонов и назначают средние значения кластеров в центре каждой из образованных областей. Кроме того, существуют и другие способы задания начальных средних значений классов. Так, в качестве начальных средних значений классов используют заранее определенные эталонные средние значения классов, соответствующие уже известным объектам. Такой метод называют смешанной классификацией.

Затем проводят первую итерацию кластеризации, где каждый пиксел изображения приписывается к тому классу, к начальному среднему значению которого в пространстве спектральных значений его значение находится ближе всего.

Вторым шагом является вычисление новых средних значений классов. Происходит переклассификация пикселей на основе критерия близости к вновь рассчитанным средним значениям классов и определяется доля пикселей, изменивших свое значение во время переклассификации.

Доля пикселей, не изменивших свое значение, сравнивается со значением порога сходимости. Если она оказывается меньше порога сходимости, то вновь рассчитываются новые средние значения классов и происходит переклассификация пикселей. Если она оказывается большей или равной порогу сходимости, то многозональное непрерывное растровое изображение преобразуется в однозональное тематическое, полутоновое или с 256-цветной 8-битной палитрой. При этом всем пикселям в каждом классе присваиваются одинаковые значения. Таким образом, объекты изображения, принадлежащие к одному классу, будут иметь одинаковый цветовой оттенок и общие атрибуты в связанной базе данных.

Полученные в результате автономной классификации классы данных не всегда однозначно соответствуют каким-либо определенным объектам изображения. Они представляют собой лишь группы пикселей с похожими спектральными характеристиками. После такой классификации необходимо еще произвести анализ результатов с целью соотнесения полученных классов и реальных объектов, отображенных на изображении. Поэтому для повышения качества идентификации классов необходимо иметь четкое представление о спектральных характеристиках отображаемых объектов. При этом лучшие результаты достигаются, если изображение состоит из достаточно однородных областей пикселей. Если области имеют сложную структуру (представляют собой смесь пикселей с различными значениями), достичь хороших результатов, используя данный метод, бывает сложнее.

Часто более хороших результатов можно добиться, задав число классов несколько большим, чем известное реальное число категорий объектов изображения. В данном случае после выполнения алгоритма автономной классификации необходимо произвести ручную дополнительную обработку полученного тематического растрового изображения, связанную с объединением некоторых классов в более общие и одновременно с этим соответствующие реальным объектам /114/.

Контролируемая классификация

Смысл контролируемой классификации заключается в отнесении каждого из пикселей снимка к *определенному классу объектов на местности*, которому соответствует некоторая область в пространстве признаков. Независимо от того, какой способ выбран для решения этой задачи, контролируемая классификация включает несколько этапов.

Первый этап заключается в определении, какие *классы объектов* будут выделены в результате выполнения всей процедуры. Это могут быть виды растительности, сельскохозяйственные культуры, породы леса, гидрографические объекты и т.д.

На *втором этапе* для каждого из классов объектов выбираются типичные для него пиксели, т.е. формируется *обучающая выборка*.

Третий этап – вычисление параметров, «спектрального образа» каждого из классов, сформированного в результате набора эталонных пикселей. Набор параметров зависит от алгоритма, который предполагается использовать для классификации.

Четвертый этап процедуры классификации – просмотр всего изображения и отнесение каждого пикселя к тому или иному классу.

Формирование обучающей выборки. Обязательным условием выполнения этой процедуры является наличие на снимке *эталонов*, т.е. фрагментов изображения, однозначно относящихся к своему классу объектов. Источниками, на основе которых выбираются эталоны, могут быть материалы специально проведенных полевых работ, карты, дешифрованные аэрофотоснимки. Все эталонные изображения классов могут быть сосре-

доточены на одном участке (прежде всего в случае использования карт и снимков) или разбросаны по всему снимку (этот случай более типичен для полевых исследований).

Процедура создания обучающей выборки реализуется выбором в пределах изображения эталонного объекта участков в несколько пикселей. В принципе процесс классификации цифрового снимка идет попиксельно, т.е. *каждый пиксел* относится к тому или иному классу. Однако в большинстве случаев конечной целью классификации является получение некоторых выделов (растительности, почв и т.д.), что ведет к *пространственному сглаживанию*, осреднению значений яркости в пределах класса, для чего и выбираются *группы пикселей*.

В идеале для классификации необходимы эталоны, полученные одновременно со съемкой и основанные на хорошо различающихся классах. На практике, как правило, существует некоторый интервал времени между получением данных и их обработкой. И в этом случае только пространственно случайное распределение, т.е. группу пикселей, можно использовать для обучающей выборки, так как использование для обучения отдельных пикселей теряет смысл.

Оценка качества обучающей выборки (эталонов)

После того как эталоны созданы, производится оценка их качества, а затем они могут быть удалены, переименованы, объединены с эталонами из других файлов и т.д. Объединение эталонов может потребоваться при осуществлении комплексной классификации с использованием эталонов, полученных разными способами.

Оценка качества эталонов необходима для того, чтобы определить, как хорошо подобраны эталонные наборы пикселей с точки зрения полноты и однозначности описания любых объектов, имеющих на анализируемом изображении. Под полнотой описания понимается ситуация, при которой любой пиксел изображения может быть безошибочно отнесен к какому-либо классу при использовании данного набора эталонов. По отношению к целому снимку обучающая выборка должна составлять 1–5% всех пикселей, а количество пикселей, относящихся к одному классу, достаточно большим (обычно не меньше 20–30). Под однозначностью понимается отсутствие перекрывания спектральных диапазонов эталонов, т.е. при любых условиях пиксел должен быть однозначно отнесен к какому-либо классу. Значения яркостей пикселей, относящиеся к одному классу, должны иметь распределение, близкое нормальному, и располагаться компактно в пространстве признаков, т.е. иметь минимально возможную дисперсию. Сформировать выборку, полностью отвечающую этим требованиям, удается не всегда, но от успешного решения этой задачи зависят результаты классификации объектов /109/.

Среди методов оценки качества эталонов можно выделить такие /114/:

- **Метод пробной классификации (Alarm).** Заключается в выделении на исходном изображении цветом тех пикселей, которые попадают в

указанный пользователем класс или несколько классов в соответствии с имеющимися эталонами при использовании для классификации правила параллелепипедов. Кроме того, при использовании данного метода имеется возможность оценить перекрытие диапазонов классификации, выделив цветом пиксели, попадающие в область перекрытия классов.

- **Метод эллипсов (Ellipse).** При использовании данного метода строятся диаграммы, описывающие диапазоны спектральных значений, соответствующие каждому классу. Диаграммы строятся в плоских системах координат для двух зон. Диапазоны рассчитываются, исходя из средних значений и стандартных отклонений, и отображаются в виде эллипсов.

Таким образом, можно так же оценить степень перекрытия диапазонов. Если эллипсы на диаграммах показывают значительное перекрытие в большинстве спектральных зон, то могут возникнуть трудности с отнесением соответствующих пикселей к тому или иному классу. В идеальном случае перекрытий быть не должно. На практике же некоторое перекрытие диапазонов является неизбежным.

- **Расчет матрицы состава (Contingency Matrix).** Спектральные характеристики пикселей эталонных участков изображения не всегда являются достаточно однородными, поэтому каждый из них можно также отнести к тому или иному классу. Каждый из пикселей эталонной области оказывает влияние на результирующие статистические характеристики эталона. Таким образом, если статистические характеристики каждого эталона достаточно отличаются от соответствующих характеристик других эталонов, то значительный процент пикселей эталонного участка изображения будет отнесен именно к данному классу. При использовании указанного метода производится пробная классификация с использованием правил минимальной спектральной дистанции, максимального правдоподобия или дистанции Махаланобиса. В результате рассчитывается так называемая матрица состава, содержащая значения доли пикселей эталонных участков, которые в результате пробной классификации были отнесены к классам, соответствующим оцениваемым эталонам.

- **Определение дивергенции (Divergence)** – статистическая оценка дистанции между эталонами в пространстве спектральных значений. Дивергенция может быть рассчитана для любых комбинаций спектральных каналов (зон), используемых в классификации. Ее применяют для выбора оптимального набора зон при выполнении классификации: используют только те зоны, для которых дивергенция, определенная по данным эталонных выборок, максимальна (высокая дивергенция). В данном случае вероятность перекрытия эталонов мала, при низкой же дивергенции высокая вероятность перекрытия эталонов.

- **Анализ статистических характеристик и гистограмм эталонов** также позволяет оценить взаимное расположение, перекрытие, размеры диапазонов пространства спектральных значений, соответствующих эталонам, и т.д. После оценки качества набора эталонов производится его

корректирование, связанное с удалением, добавлением, объединением классов, исключением из рассмотрения некоторых зон изображения для обеспечения более точных результатов классификации.

Алгоритмы контролируемой классификации

При разработке алгоритмов контролируемой классификации используются два подхода: детерминированный и статистический (иногда их называют непараметрическими и параметрическими).

Детерминированный подход применяется, когда классы объектов не пересекаются в пространстве признаков. Однако природные объекты, как правило, неоднородны, а спектральные характеристики изучаемых объектов довольно близки и частично пересекаются (например, разных видов растительного покрова или почв). Поэтому широкое распространение получили методы классификации, основанные на *статистическом подходе*, которые позволяют учитывать вариации признаков и допускают отнесение пикселей к «чужим» классам, если частота их появления относительно мала /109/. Рассмотрим основные методы контролируемой классификации.

Метод параллелепипеда (Parallelepiped decision rule) реализует наиболее простой алгоритм, основанный на детерминированном подходе. В основном применяется, когда значения спектральной яркости разных объектов практически не перекрываются, а классов объектов немного, т.е. для классификации четко различающихся объектов.

В качестве эталонных характеристик классов задаются некоторые интервалы значений яркости. Они выбираются в результате анализа гистограммы распределения яркости на изображении. В пространстве признаков интервалы значений яркости определяют замкнутую область, которая в зависимости от размерности поля признаков может иметь форму параллелограмма, параллелепипеда или гиперпараллелепипеда для четырех и более зон. Классификация всех пикселей снимка, состоящего, например, из трех съемочных зон, заключается в отнесении каждого из них к тому классу объектов, в параллелепипед которого он попадает по своим значениям яркости. Поскольку область распределения значений спектральных признаков каждого из классов имеет четкие рамки, на снимке могут оказаться пиксели, не попадающие ни в одну из областей. Такие пиксели называют неклассифицированными, и на результирующем изображении им обычно присваивается или белый, или черный цвет.

Преимущества способа – простота, отсутствие требований к распределению значений яркости, быстрота выполнения классификации.

Этот способ часто применяют в сочетании с более сложными, чтобы быстро отделить объекты, не пересекающиеся по диапазонам характерных значений яркости с другими, а уже затем обрабатывать оставшиеся участки с помощью более сложных способов. Например, по сочетанию значений яркости в красной и ближней инфракрасной зоне снимка можно отделить растительность от открытых почв перед компьютерным дешифрированием типов растительности /104/.

Методы минимального расстояния (Minimum Distance) для классификации объектов с похожими спектральными признаками используют, когда спектральные признаки разных классов довольно похожи и диапазоны значений их яркости перекрываются. Метод основан на вычислении минимального расстояния между классами в пространстве признаков. Поскольку измеренные и эталонные спектральные признаки объектов точно не совпадают, решение о принадлежности пикселей к тому или иному классу принимается на основании анализа некоторой меры близости.

Решающее правило минимального расстояния рассчитывает спектральное расстояние между вектором значений яркости пикселя и вектором средних значений каждого эталона (обучающей выборки). Пиксел приписывается к классу с ближайшим средним значением. Правило классификации основано на вычислении и оценки евклидова расстояния.

Так как для каждого пикселя всегда существует ближайший эталон, то неклассифицированных пикселей нет. С другой стороны, пиксели, которые должны были бы быть неклассифицированными (т.е. они не являются спектрально близкими к среднему значению какой-либо выборки в приемлемых для пользователя границах), становятся классифицированными. Альтернативой является введение пороговых значений расстояний.

Поскольку метод не учитывает изменчивость яркости в классе (дисперсию), то он плохо классифицирует, например, городские территории, образуемые пикселями с высокой дисперсией. И наоборот, в класс с минимальной дисперсией, наподобие класса воды, может быть отнесено существенно больше пикселей, чем в действительности /110/.

В качестве меры близости используют также расстояние Махаланобиса (Mahalanobis Distance), применяемое в предположении нормальности распределения значений данных и основанное на учете их корреляции. Отличие заключается в том, что здесь измеряется не евклидова, а скорректированная на дисперсию эталонной выборки пикселей дистанция – расстояние Махаланобиса. Корректировка на дисперсию заключается в том, что при равенстве евклидовых дистанций от точки пространства спектральных значений, соответствующей рассматриваемому пикселу, до точек, соответствующих средним значениям двух эталонных выборок классов, пиксел будет отнесен к тому классу, дисперсия эталонной выборки которого больше /114/.

Методы минимального расстояния используют часто для классификации самых разнообразных объектов как на суше, так и в акваториях. Для успешной классификации необходимо, чтобы значения спектральной яркости объектов компактно группировались вокруг средних значений соответствующих классов. Однако нередко ситуации, когда область значений яркости класса так вытянута в пространстве спектральных признаков, что часть попадающих в нее пикселей ближе по яркости к средним значениям других классов. В этом случае способ даст ошибочную классификацию. Поэтому чаще применяют более сложный метод, учитывающий особенно-

сти взаимосвязи между спектральными зонами, т.е. особенности спектрального образа объекта /104/.

Метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood) для классификации с учетом спектрального образа объектов предполагает нормальное распределение значений яркости в пределах каждого класса во всех спектральных зонах и использует ковариации между значениями спектральной яркости.

Область признаков каждого класса в многомерном пространстве имеет форму эллипса (точнее, гиперэллипса), относительные размеры и ориентация которого характеризует распределение вероятности и определяется ковариационной матрицей. Среднее значение яркости этого класса в каждой из съемочных зон, т.е. центр класса, определяет положение эллипса в пространстве признаков. По обучающей выборке для каждого класса рассчитываются минимальные, максимальные и средние значения спектральной яркости и матрица ковариации, характеризующая взаимосвязи между значениями яркости класса в разных спектральных зонах. Чем ближе значения яркости пиксела к центру определенного эллипса, тем выше вероятность принадлежности пиксела к соответствующему классу. При классификации удовлетворяется условие максимальной вероятности отнесения пиксела к данному классу (максимального правдоподобия) – отсюда название способа. Метод основан на так называемом правиле Байеса /124/, которое позволяет дополнительно учитывать информацию о вероятностях появления на изображении пикселей того или иного класса. Пользователь имеет возможность задать весовые коэффициенты для вероятностей вхождения пикселей в каждый из классов, таким образом для некоторых классов увеличив, а для некоторых уменьшив области пространства спектральных значений, ограниченные внешним контуром вероятности. Это позволяет наиболее полно использовать всю имеющуюся информацию и достичь наилучших, по сравнению с любым другим методом, результатов классификации.

В основе метода лежит статистический подход к решению задачи классификации, когда появление на снимке конкретного объекта, относящегося к классу «с», считается случайным событием. Вектор признаков объекта X также считается векторной случайной величиной. Для решения задачи классификации нужно знать: a_c – априорную вероятность появления класса «с»; $P(X/c)$ – функцию условной плотности распределения вероятностей вектора признаков X , если объект относится к классу «с» – правдоподобие класса «с» при данных значениях признака X . Классификация по методу максимального правдоподобия относит каждый вектор признаков X к тому классу объектов, для которого его правдоподобие максимально. Для этого необходимо знать статистические характеристики дешифровочных признаков объектов. Эту информацию получают путем анализа яркостей в пределах эталонных объектов на снимке и на ее основе строятся функции $P(X/c)$, которые называются обучающими и считаются априори известными.

ми. Предполагается также, что распределение спектральных яркостей объекта подчинено нормальному закону. В таком случае функция плотности распределения вероятности класса «с», представленном вектором яркостей X , будет иметь вид /125/:

$$D = \ln(a_c) - /0,5\ln(|Cov_c|) - /0,5(X-M_c)^T(Cov_c^{-1})(X-M_c),$$

где D – взвешенное расстояние, c – класс, до которого определяется расстояние, X – вектор расстояния от текущего пиксела до этого класса, M_c – вектор средних значений обучающей выборки для класса «с», a_c – вес класса «с» (априорная вероятность того, что данный пиксел принадлежит классу «с»), Cov_c – матрица ковариаций обучающей выборки для класса «с» (обозначение $^{-1}$ означает математическую операцию обращения матрицы, а T – транспонирования матрицы).

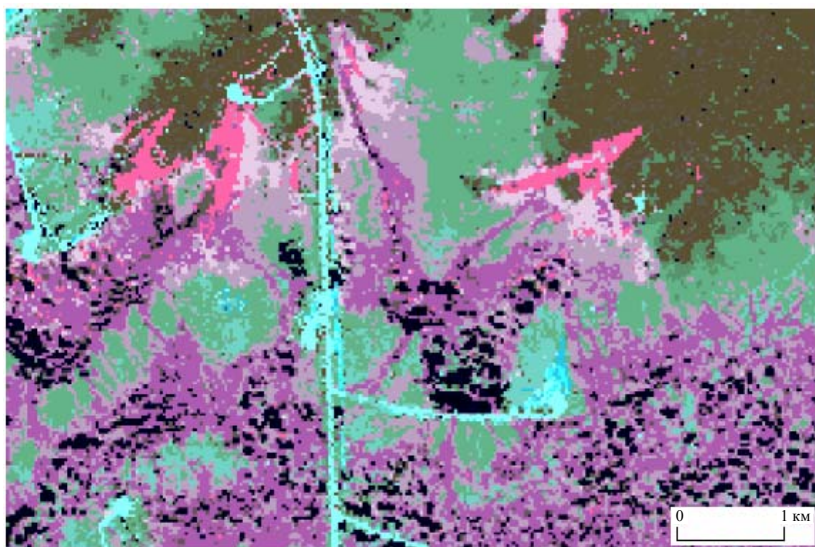
На рис. 1.30 (см. цв. вкладку) представлена карта болотных микроландшафтов, составленная с использованием метода максимального правдоподобия. При этом были заданы весовые коэффициенты вероятностей встречаемости каждого из классов на исследуемой территории. Что позволило использовать пространственную информацию о структуре болотных массивов и достичь наилучших результатов классификации, по сравнению с другими методами. Однако при автоматической классификации нет возможности выделить отдельным классом грядово-мочажинно-озерковые и грядово-озерковые микроландшафты. Эти микроландшафты выделяются среди грядово-мочажинных микроландшафтов только экспертным путем (см. рис. 1.31, см. цв. вкладку).

Так, например, частота встречаемости для исследуемой территории сфагново-кустарничково-сосновых микроландшафтов в несколько раз выше, чем сосново-сфагново-кустарничковых или сфагново-кустарничково-сосновых с обилием лишайников. Также частота встречаемости грядово-мочажинных со сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцериево-осоковыми и сфагново-осоково-очеретниковыми мочажинами выше, чем грядово-мочажинных со сфагново-пушицевыми и сфагново-пушицево-шейхцериевыми мочажинами.

Оценка качества классификации

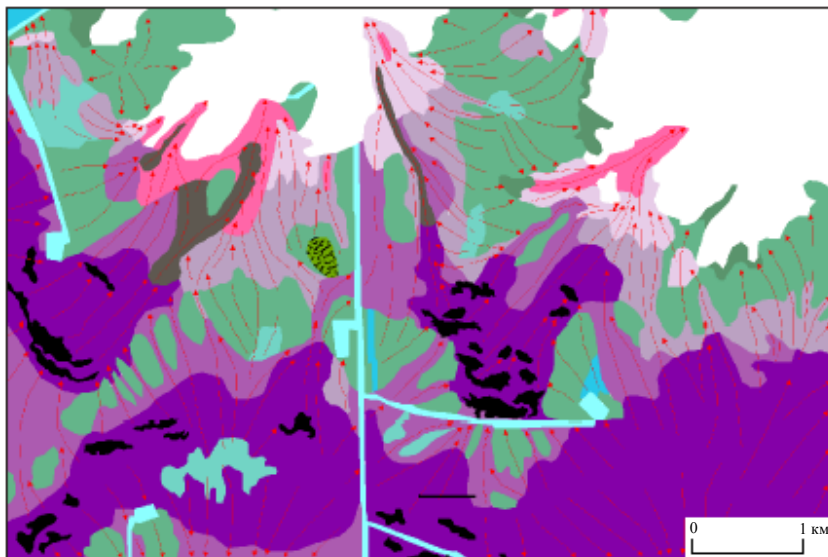
После того как классификация выполнена, необходимо оценить точность ее результатов, которая подразумевает оценку точности совпадения полученных классов и классов местности. Однако, поскольку границы классов местности, как правило, достоверно неизвестны, оценивают такой показатель, как достоверность классификации, который определяется как процент пикселей, верно отнесенных к классу, заданному как эталон. Для оценки качества классификации могут быть использованы разные способы:

- визуальный экспертный анализ с привлечением всех известных данных об объектах местности;
- проверка по данным в координатно привязанных точках наземных наблюдений, не использованных при наборе обучающих выборок;
- оценки статистических характеристик выборок и итоговых классов.



- озера, микроозерки
- сосново-сфагново-кустарничковые
- сфагново-кустарничково-сосновые
- сфагново-кустарничково-сосновые с обилием лишайников
- сфагново-осоковые и сфагново-осоково-пушицевые
- сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи
- сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи или сфагново-шейхцериевые, сфагново-шейхцеригово-осоковые, сфагново-осоково-очеретниковые и сфагново-осоково-шейхцеригово-вахтовые мочажины с открытой водной поверхностью
- грядово-мочажинные со сфагново-пушицевыми и сфагново-пушицево-шейхцериевыми мочажинами
- грядово-мочажинные со сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцеригово-осоковыми и сфагново-осоково-очеретниковыми мочажинами
- деградированная растительность (засохшие сосны и кустарнички сфагново-кустарничково-соснового микроландшафта)
- лесная растительность
- техногенные объекты (кустовые площадки, промзоны, дороги)

Рис. 1.30. Карта классификации болотных микроландшафтов верхового болотного массива в районе Первомайского месторождения, составленная с использованием метода максимального правдоподобия



- озера, микроозерки
- сосново-сфагново-кустарничковые
- сфагново-кустарничково-сосновые
- сфагново-кустарничково-сосновые с обилием лишайников
- сфагново-осоковые и сфагново-осоково-пушицевые
- сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи
- сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи или сфагново-шейхцериевые, сфагново-шейхцериево-осоковые, сфагново-осоково-очеретниковые и сфагново-осоково-шейхцериево-вахтовые мочажины с открытой водной поверхностью
- грядово-мочажинные со сфагново-пушицевыми и сфагново-пушицево-шейхцериевыми мочажинами
- грядово-мочажинные со сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцериево-осоковыми и сфагново-осоково-очеретниковыми мочажинами
- грядово-мочажинно-оверковые и грядово-озерковые
- деградированная растительность (засохшие сосны и кустарнички сфагново-кустарничково-соснового микроландшафта)
- искусственные водоемы на болоте
- техногенные объекты (кустовые площадки, промзоны, дороги)
- генерализованные линии стекания

Рис. 1.31. Карта болотных микроландшафтов верхового болотного массива в районе Первомайского месторождения, составленная по результатам визуального дешифрирования снимка ETM+/Landsat 7 с полевой проверкой

Визуальный экспертный анализ необходим на всех стадиях оценок полученных результатов классификации.

Проверять каждый пиксел классифицированного изображения на соответствие истинным данным о поверхности или каким-либо иным образом не практично. Поэтому, как правило, используют набор эталонных пикселей. Эталонные пиксели – это точки на классифицированном изображении, для которых известны фактические данные. Целесообразно использовать данные в точках наземных обследований, координатно привязанных с помощью GPS-приемников /126, 127/ и не находящихся ни на одном из участков обучающих выборок (которые, естественно, должны классифицироваться правильно). По координатам точки накладываются на снимок, и имеющиеся полевые определения сопоставляются с полученными на снимке классами. В зависимости от точности приемника, координатной привязки и разрешения снимка классы могут определяться в радиусе до нескольких пикселей от контрольной точки.

Оценка статистических характеристик может выполняться интерактивно с использованием доступных компьютерных средств. Она включает:

- определение пороговых значений для отделения ошибочно классифицированных пикселей;
- оценку точности и достоверности на основе сравнения результатов классификации с истинными данными о земной поверхности или другими данными.

Определение пороговых значений представляет собой процесс идентификации пикселей классифицированного изображения, которые, вероятнее всего, классифицированы неправильно, на основании оценки расстояний, которые были использованы в решающем правиле классификации. Эти пиксели помещаются в другой класс (обычно – класс 0).

При выполнении классификации по методу минимального расстояния или максимального правдоподобия можно получить файл изображения расстояний (файл дистанций) дополнительно к выходному тематическому растровому слою. Это однозональный непрерывный растровый слой, использующий 32-битную панхроматическую (оттенки серого) цветовую палитру, для которого каждое значение файла данных представляет результат определения спектрального расстояния в соответствии с используемым решающим правилом. Например, при классификации по принципу минимального расстояния каждое значение является евклидовым спектральным расстоянием между вектором измерения пикселя и средним вектором его класса, при использовании правила максимального правдоподобия – дистанцией в пространстве вероятностей.

Светлые пиксели файла дистанции (более высокие их файловые значения) расположены спектрально дальше от средних значений выборки класса, к которому они были приписаны, и, таким образом, более вероятно, что они классифицированы ошибочно. Темные пиксели расположены спектрально ближе, и более вероятно, что они классифицированы пра-

вильно. При использовании методов контролируемой классификации наиболее темные пиксели обычно являются эталонными.

Для объектов, выделяемых в результате классификации, точность выражается в оценках соответствия, определенности или правдоподобия. Наиболее часто применяемый способ оценки точности результатов классификации основан на построении матрицы классификации или матрицы ошибок /110/. Число эталонных пикселей всех классов вводится пользователем. Для надежной оценки классификации важны как число таких пикселей-образцов, так и расположение их на местности, а также время сбора информации в этих точках, поскольку объекты могут измениться с момента съемки. Процесс оценки включает /110/:

- создание матрицы классификации, размерность которой $N \times N$ определяется числом классов, путем простого сопоставления эталонных пикселей с классифицированными;
- расчет статистических оценок точности в процентном выражении, исходя из результатов сопоставления, зафиксированных в матрице.

При интерпретации оценок достоверности важно обратить внимание на процентные количества правильно классифицированных пикселей и определить природу ошибок (программы или пользователя). В идеале все точки должны располагаться по диагонали матрицы; это показывает, что на местности и карте классификации зафиксирован один и тот же класс. Ошибка пропуска возникает тогда, когда точки класса на местности классифицированы неправильно.

Для обобщения матрицы соответствия используют такой показатель достоверности классификации, как количество правильно классифицированных точек, расположенных по диагонали матрицы (в %). На самом деле это число может быть случайным. Чтобы учесть этот факт, часто при обобщении результатов используют так называемый индекс κ – Каппа Коэна, вносящий поправку на случайность. Он вычисляется по формуле:

$$\kappa = (d - q) / (N - q),$$

где d – число случаев правильного получения результата (сумма значений, стоящих на диагонали матрицы соответствия); q – число случайных результатов, вычисляемое через число случайных результатов в строках n_c и истинных в столбцах n_r матрицы соответствия как $q = \sum n_c n_r / N$, N – общее число точек.

Практический опыт показывает, что можно добиться достоверности классификации в 90–95% для 2–10 классов и 70–85% для 20–30 классов при достаточной изученности исследуемой территории полевыми и аэровизуальными наблюдениями и наличием АФС для труднодоступных районов.

Составление карт по цифровым снимкам

Заключительной стадией дешифрирования цифровых снимков является составление тематических карт, т.е. представление информации в векторном формате. Составление их можно разделить:

- на **цифрование экранного изображения**, которое применяется преимущественно при визуальном дешифрировании и при необходимости генерализации преобразованного или классифицированного растрового изображения;

- **автоматическую векторизацию классифицированного растрового изображения.**

В результате компьютерной классификации получают растровое изображение, каждый из пикселей которого отнесен к определенному классу. Обычно его называют картой классификации, однако это изображение может быть названо картой лишь условно, даже если оно имеет географические или прямоугольные координаты.

Разделение объектов при классификации основано на их яркостных свойствах, а на карте – по их сущности. Кроме того, карта классификации лишена картографической генерализации. Дополнительная обработка полученного изображения может частично компенсировать эти недостатки. Наиболее часто используемые процедуры – объединение классов, относящихся по своей сущности к одной категории, и фильтрация изображения.

Фильтрация изображения направлена на некоторое обобщение изображения и заключается в том, что одиночным пикселям присваивается имя класса, преобладающего среди соседних, непосредственно примыкающих к нему пикселей. Эта процедура может применяться не только к результату классификации, но и для улучшения визуального восприятия снимка на экране, устранения помех и шумов, а также при подчеркивании границ и выделении линейных объектов, о чем говорилось ранее.

Цифровой снимок и любые результаты автоматизированной обработки (преобразования яркостей, математических операций и классификации) всегда представлены в растровом формате. Чтобы перейти к карте в векторном формате, возможны два варианта: векторизация или цифрование с экрана.

Процедура **автоматической векторизации растрового изображения** заключается в оконтуривании всех пикселей, различающихся по яркости или присвоенному значению (имени) с соседними элементами. В процессе векторизации не предусматривается обобщение, поэтому необходимо редактирование полученных контуров. Хорошие результаты можно получить лишь в том случае, если на картографируемой территории преобладают однородные и компактные объекты. Только в этом случае редактирование полученного изображения не требует значительного времени.

При **цифровании экранного изображения** дешифровщик обводит курсором нужные границы, которые фиксируются в векторном формате. Выполнение этой процедуры занимает несравнимо больше времени. Однако в случае, когда картографируемые географические объекты представляют сочетание разнородных элементов или они слишком мелки и детальны относительно масштаба создаваемой карты, цифрование экранного

изображения может оказаться значительно более эффективным, чем редактирование автоматически векторизованного изображения. При таком подходе дешифровщик может производить целевой отбор дешифрируемых элементов и исключать массу деталей изображения, представляющих ненужную информацию для решения основной задачи дешифрирования. Это позволяет обеспечить читаемость карты. При неизбежном упрощении важно сохранить в рисунке отдешифрованных контуров естественный природный рисунок, не утратить их при схематизации.

Карты, составленные по снимкам, как правило, более подробны, лучше отображают пространственные закономерности распределения исследуемых объектов, но полнота и достоверность их содержания обеспечиваются привлечением дополнительных источников, совместно с которыми и используют снимки при аэрокосмическом картографировании /104/.

Лучшие результаты при составлении карт по цифровым аэрокосмическим снимкам можно получить, если использовать в качестве «подложки» при цифровании с экрана не одно, а несколько растровых изображений. Для дешифрирования растительности болотных микроландшафтов по снимкам ETM+/Landsat 7, а также по другим снимкам, имеющим схожие характеристики, рекомендуется анализировать цветной синтезированный снимок (RGB – 4, 5, 3 зоны съемки) и результаты классификации, а также для более уверенного построения генерализованной сетки линий стекания болотных вод использовать преобразованное изображение высокочастотным фильтром (окно 3×3 пиксела с коэффициентами фильтра 11 в центре и –1 для всех остальных), подчеркивающие линейные вытянутые микроландшафты. Повысить достоверность составляемой карты может использование нескольких разных цифровых снимков, трансформированных и приведенных к единой координатной системе, к примеру, фотоплан из черно-белых аэрофотоснимков и изображение цветного синтезированного КС. Основные дешифровочные признаки основных типов болотных микроландшафтов и поверхностной гидрографической сети на болотах на АФС и КС приведены в табл. 1.1. Использование представленных наборов дешифровочных признаков при сопоставительном анализе АФС и КС позволяет надежно идентифицировать основные типы болотных микроландшафтов и ориентировку линий стекания болотных вод. На рис. 1.31 (см. цв. вкладку) представлена карта болотных микроландшафтов верхового болотного массива в районе Первомайского месторождения, составленная по результатам визуального дешифрирования КС с полевой проверкой.

Наглядное, выразительное отображение местности на аэрокосмических снимках вызывает естественное стремление использовать аэрокосмическое изображение в дополнение к карте, а иногда и вместо нее. Это привело к созданию по многим снимкам нового вида картографической продукции – фотокарт, которые представляют собой трансформированные в картографическую проекцию и имеющие минимальную картографическую нагрузку аэрокосмические изображения.

Изучение структуры верховых болотных массивов по материалам ДДЗ имеет большую практическую значимость. Так, при существующем уровне технологии обустройства и эксплуатации нефтегазовых месторождений определение водоохранных зон (ВЗ) и прибрежных защитных полос поверхностных водных объектов оценивается как важнейшее природоохранное мероприятие, входящее в систему приоритетов региональной политики природопользования. Размеры ВЗ нормируются в действующем нормативном документе /128/. Для природно-климатических условий Западной Сибири особую значимость приобретает задача установления ВЗ болотных массивов. Решение ее сопряжено с определенными трудностями ввиду отсутствия в действующем «Положении...» рекомендаций и проектных норм для условий Западной Сибири. Отсутствие конкретных методических указаний затрудняет разработку проектов водоохранных зон, а также проектных документов на разработку и обустройство месторождений нефти и газа. В случае методически необоснованного и нерационального решения вопроса установления ВЗ верховых болот большая часть территорий месторождений может оказаться в пределах их водоохранных зон. Вследствие этого выполнение проектов имеет ясно выраженный региональный аспект, при котором качество и проектные решения всецело определяются наличием детальных материалов наблюдений (геоботанических, гидрологических, гидрофизических) на болотных системах, а также квалификацией экспертов и сотрудников проектных, научно-исследовательских организаций.

Необходимыми и достаточными условиями для решения вопроса об установлении ВЗ для конкретных болотных массивов можно считать: наличие в их структуре обводненных участков, в пределах которых, или в непосредственной близости от их границ, берут начало водотоки (реки и ручьи), и возможность поверхностного притока воды к границам участков. В этом случае может осуществляться миграция загрязняющих веществ с поверхностным стоком и попадание их в водоток и, соответственно, появляется необходимость установления ВЗ. Плановые очертания водоохранных зоны зависят от морфологии рельефа суходолов, прилегающих к участку, и особенностей водообмена в его границах.

В течение 2001–2006 гг. в ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК» разработано свыше 20 проектов водоохранных зон и прибрежных защитных полос водных объектов месторождений ОАО «Томскнефть» ВНК. Проекты получили положительное заключение Государственной экологической экспертизы и утверждены постановлением администрации Томской области. Комплект проектных документов зарегистрирован во ВНТИЦ /129, 130/, и основы методики установления водоохранных зон для болотных массивов опубликованы /131–134/.

Придерживаясь положений ландшафтно-гидрологического анализа /135/, мы применили для установления водоохранных зон верховых болотных массивов методические подходы, основанные на определении гидрологических характеристик микроландшафтов болотных систем. Гидрологиче-

ская характеристика болотных массивов выполнена по материалам инженерно-экологических изысканий, проводившихся ОАО «ТомскНИПИ-нефть ВНК» в 2001–2006 гг., данным дистанционного зондирования, а также с учетом результатов экспедиционных воднобалансовых исследований Западно-Сибирской экспедиции ГГИ /5, 6, 11, 136, 137/.

Применительно к задаче установления ВЗ дешифрование АФС и КС состояло в использовании прямых и косвенных дешифровочных признаков для определения характеристик микроландшафтов болотных массивов и внутриболотных водосборов. Типы микроландшафтов и их пространственное распределение являются наиболее надежными индикаторами изменения коэффициента фильтрации вдоль линии стекания и, соответственно, условий их обводнения. Внутриболотные водосборы практически можно определить только на АФС и КС по сеткам линий стекания.

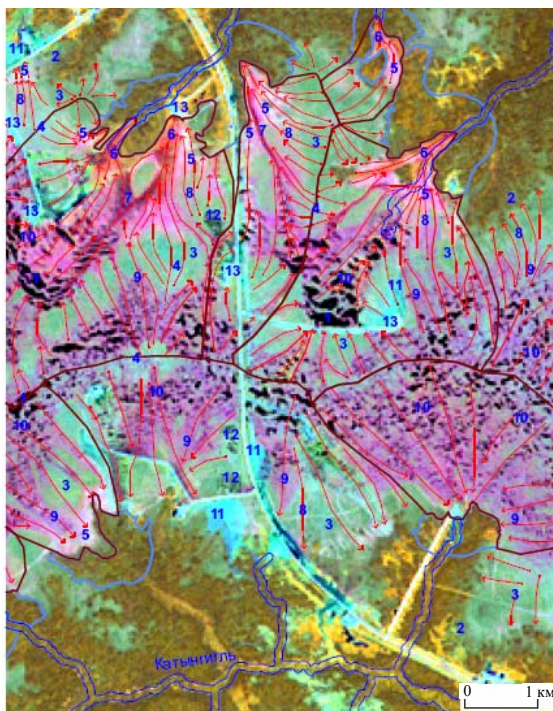
На основании особенностей формирования стока с болотных массивов и с заболоченных водосборов принята следующая схема установления ВЗ верховых болот:

1) в соответствии с /128/ определяются водные объекты – верховые болота, формирующие сток в водосборном бассейне;

2) по материалам дешифрования АФС, КС и результатам наземных обследований определяются фрагменты болотных массивов – микроландшафты с наибольшими значениями модулей проточности, в пределах которых концентрируется болотный сток и формируется поверхностный сток в первичной гидрографической сети. Для болотных массивов территорий месторождений Томской области таковыми являются: сильнообводненные грядово-мочажинные и грядово-озерковые микроландшафты с площадью гряд от 10 до 30% и площадью мочажин соответственно от 70 до 90%; сфагново-осоковые, сфагново-осоково-пушицевые микроландшафты и мохово-травяные топи. Гидрологическая характеристика указанных микроландшафтов выглядит следующим образом: модуль проточности 50–170 и 170–240 см²/с; средняя многолетняя величина проточности 5–15 и 5–9 л/(с·км) и уклон поверхности 0,0008–0,0018 и 0,0001–0,0005 /6/;

3) водоохранная зона устанавливается от границы сильно обводненных микроландшафтов на прилегающей суходольной территории в соответствии с принципами, изложенными в /128/ как для озер (в зависимости от площади локальных водосборов выделенных сильно обводненных микроландшафтов). При этом под локальным водосбором микроландшафта понимается часть площади болотного массива, с которой осуществляется сток болотных вод в микроландшафт.

На рис. 1.32 (см. цв. вкладку) представлена фотокарта на основе космического снимка ETM+/Landsat 7 участка территорий Первомайского месторождения, на который нанесены границы локальных водосборов, ВЗ, обозначены микроландшафты и показаны генерализованные линии стекания болотных вод, которые построены на основании выше изложенных принципов.



- | | |
|---|--|
| 1 озера, микроозерки | → генерализованные линии стекания |
| 2 сосново-сфагново-кустарничковые | — граница локального водосбора |
| 3 сфагново-кустарничково-сосновые | — граница водоохраной зоны водотоков |
| 4 сфагново-кустарничково-сосновые с обилием лишайников | — граница водоохраной зоны болот |
| 5 сфагново-осоковые и сфагново-осоково-пушицевые | |
| 6 сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи | |
| 7 сфагново-осоково-вахтово-шейхцериевые топи или сфагново-шейхцериевые, сфагново-шейхцериево-осоковые, сфагново-осоково-очеретниковые и сфагново-осоково-шейхцериево-вахтовые мочажины с открытой водной поверхностью | |
| 8 грядово-мочажинные со сфагново-пушицевыми и сфагново-пушицево-шейхцериевыми мочажинами | |
| 9 грядово-мочажинные со сфагново-шейхцериевыми, сфагново-шейхцериево-осоковыми и сфагново-осоково-очеретниковыми мочажинами | |
| 10 грядово-мочажинно-оверковые и грядово-озерковые | |
| 11 деградировавшая растительность (засохшие сосны и кустарнички сфагново-кустарничково-соснового микроландшафта) | |
| 12 искусственные водоемы на болоте | |
| 13 техногенные объекты (кустовые площадки, промзоны, дороги) | |

Рис. 1.32. Фотокарта участка территорий Первомайского месторождения (основа снимок ETM+/Landsat 7, RGB – 4, 5, 3 зоны съемки)

Кроме этого, типологические карты болотных массивов, построенные по ДДЗ, используются для задач оптимизации размещения техногенных объектов и коммуникаций на болотных массивах для ограничения их возможного вредного воздействия. Так, при прокладке дорог и трубопроводов предусматривается строительство водопропускных сооружений на основании сгущения сеток линий стекания, при размещении площадных объектов в зависимости от типов микроландшафтов и сеток линий стекания, расположенных выше и ниже планируемых объектов. Также типы болотных микроландшафтов и их геоморфологическое положение на болотном массиве косвенно служат индикаторами мощности торфяной залежи, что важно при проектировании объектов. Следует отметить работу /138/, в которой предложен способ выделения зон с различной степенью опасности на лесо-болотных территориях и болота рассматриваются как уникальные природные образования, с присущими только им структурно-функциональными свойствами, отличающимися как от водных, так и от суходольных экологических систем.

Глава 2. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА ПЛОЩАДКАХ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ, РАЗРАБОТКА ПЛАНА ЛИКВИДАЦИИ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ НА НИХ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Нефтяная отрасль по глубине и многообразию негативных воздействий на окружающую среду превосходит все другие отрасли топливно-энергетического комплекса. Наиболее ощутимо эти воздействия проявляются в условиях старения системы трубопроводов для транспорта углеводородного сырья и продуктов переработки нефти. Эксплуатируемые нефтепроводы относятся к категории опасных объектов, что обусловлено значительным материальным и экологическим ущербом в случае аварийной ситуации /139/.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что несмотря на самые высокие требования, предъявляемые к надежности, и большие затраты на техническое обслуживание, безопасная эксплуатация трубопроводных систем невозможна. Поэтому нефтяные компании наряду с ужесточением требований к повышению надежности трубопроводных систем идут по пути обеспечения максимально возможной готовности к ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. На предприятиях компаний создаются и функционируют специальные службы для борьбы с аварийными разливами, регулярно проводятся учения на федеральном и региональном уровнях по их устранению на поверхности водных объектов и почвы.

Наиболее эффективное и экономичное решение по предотвращению аварий на нефтепроводах состоит в проведении предупредительных мер: диагностика, капитальный ремонт и реконструкция нефтепроводов. Наличие информации о дефектах и степени их опасности дает возможность обоснованно планировать объем и очередность ремонта. Это позволяет поддерживать высокую степень надежности и безопасности объекта. Одной из наиболее важных превентивных мер, направленных на безопасность нефтепроводов, является готовность соответствующих служб к ликвидации последствий возможных аварий /140, 147/. Обеспечение оперативной связи при нештатных ситуациях в любой точке трассы нефтепровода – одна из важнейших задач, так как от своевременного получения информации зависят дальнейшие действия по ликвидации аварийной ситуации /141, 142/.

Строительство переходов через водные преграды осуществляется в большинстве случаев традиционным способом: подготовка траншеи, укладка в нее трубы и последующая засыпка. Недостатки метода – длительные сроки выполнения работ, большой объем земляных работ, ущерб окружающей среде (нарушение прирусловой и русловой части, ущерб рыбному хозяйству), значительные затраты на мониторинг, инструментальный контроль, укрепление берегов и засыпку оголенных участков при эксплуатации переходов.

Наряду с традиционным методом, существует метод наклоннонаправленного бурения и микротоннелирования /139/. Этот метод стали применять сравнительно недавно, но с его использованием построено уже более 3 000 переходов.

ОАО «Томскнефть» ВНК эксплуатирует в основном трубопроводы, запроектированные и построенные по траншейному методу, поэтому нами рассмотрены проблемы, связанные с применением выбранного метода.

Подводные переходы – самое уязвимое звено системы транспорта нефти. Наиболее тяжелые экологические последствия вызывают аварийные разливы углеводородного сырья и продуктов переработки нефти именно на участках подводных переходов трубопроводов (рис. 2.1, см. цв. вкладку). Этому посвящены публикации в специальных и периодических изданиях /143–150/.

Анализ причин, вызывающих необходимость переукладки подводных переходов, показывает, что наиболее распространенными (до 70% случаев) являются оголения и провисы трубопроводов. К другим факторам риска относятся: оголения и провисы из-за русловых деформаций рек и неточного определения отметок линии предельного размыва; длительный (более 30) срок эксплуатации, устранение дефектов по результатам диагностики, устранение неравнопроходного с линейной частью диаметра для проведения диагностики, техногенные процессы /139, 151/.

В связи с этим решение задач оценки экологической ситуации на площадках подводных переходов трубопроводов, разработка плана ликвидации возможных аварий на них и мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций, обеспечивающих надежную эксплуатацию подводных переходов трубопроводов ОАО «Томскнефть» ВНК, является очень актуальным.

В 2001 г. в ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК» выполнена работа «Разработка регламента по эксплуатации и обслуживанию подводных переходов трубопроводов, а также ликвидация возможных аварий» /152/. На указанный проектный документ имеются заключение экспертизы промышленной безопасности Управления Западно-Сибирского округа Госгортехнадзора России № 35ПВ-33417-2002 от 19.08.2002 г., заключение № 722 от 29.04.2002 г. Главного управления по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям Томской области (ГУ ГОЧС), заключение Управления по охране окружающей природной среды Ханты-Мансийского авто-

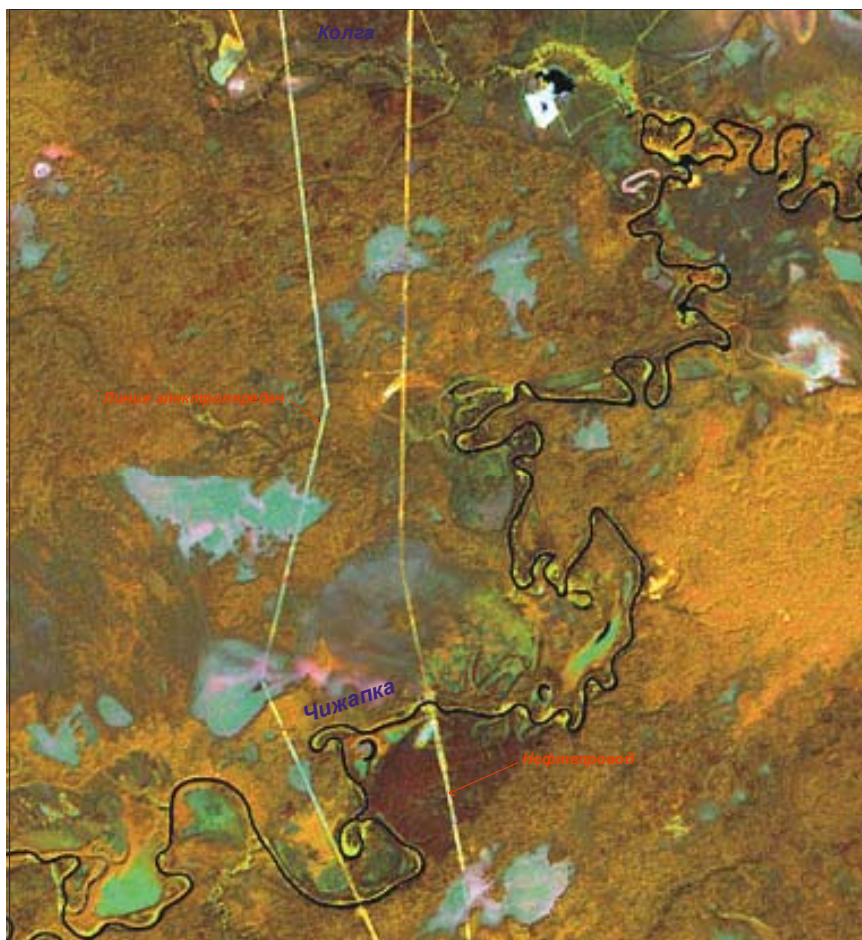


Рис. 2.1. Космический снимок бассейна р. Чижанка в районе нефтегазового месторождения

номного округа № 391 от 10.07.2002 г., заключение государственной водохозяйственной экспертизы Комитета природных ресурсов по Томской области № 051/02 от 24.04.02 г.

2.1. Оценка экологической ситуации на площадках подводных переходов трубопроводов

В настоящее время в нефтяной отрасли эксплуатируется более тысячи километров нефтепроводов, пересекающих естественные водные преграды.

Подводные переходы нефтепроводов эксплуатируются в сложных условиях, связанных с русловыми и пойменными процессами на реках, эрозионными и оползевыми явлениями на берегах. По нефтепромысловым трубопроводам транспортируется многофазовая продукция скважин с содержанием в нефти воды и других примесей, что приводит к коррозии трубопроводов. Поэтому к надежности подводных нефтепроводов предъявляются высокие требования, так как даже незначительные повреждения с потерей герметичности вызывают тяжелые экологические последствия.

Проведенный нами анализ нормативной, технической, справочной и обзорной литературы по тематике проектирования и строительства переходов нефтепроводов через водные преграды показал, что безопасность и надежность их работы зависят от качества и полноты выполнения инженерных изысканий (важнейшим этапом инженерных изысканий подводных переходов является прогнозирование плановых и высотных деформаций берегов и дна водных преград, выбор участков и створов перехода трубопроводов), конструктивных решений и качества выполнения строительства.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на интенсивность протекания планово-высотных деформаций русла рек, является скорость течения и устойчивость защитного слоя грунта над нефтепроводами, размыв и вынос которого приводит к появлению участков с недостаточным заглублением, наличию оголенных и провисающих участков подводных переходов магистральных нефтепроводов, приводящих к повреждению нефтепроводов /147/.

Повреждения трубопроводов чаще случаются там, где есть крутой подъем либо искусственное сооружение – насыпь, в которую уложена труба. Сезонные смены состояний грунта, его промерзание, а затем оттаивание и усадка приводят к деформации трубы, что особенно опасно для сварных швов. Зная характер грунтов и особенности рельефа местности, можно моделировать развитие ситуации при возможной аварии на любом конкретном отрезке магистрали /139/.

По нашему мнению, серьезное значение имеют решения задач обеспечения геодинамической безопасности при строительстве и эксплуатации подводных нефтяных переходов – с учетом «зон риска» в местах активных разломов земной коры, при использовании подземного пространства.

Земная кора и ее верхние слои неоднородны. В пределах Западно-Сибирской равнины неоднородностями являются тектонические нарушения и трещины, геодинамические и геопатогенные зоны. Неоднородная геологическая среда постоянно подвергается воздействию внутренних (эндогенных) и внешних (экзогенных и планетарных) факторов периодического характера, а также техногенных факторов, вызванных деятельностью человека.

Периодическое взаимодействие внутренних и внешних факторов с геологической средой вызывает ее адекватную волновую реакцию, выражающуюся в возмущении всех физических полей, образовании сети глубоких разломов, трещинных, геодинамических и геопатогенных зон, которые проявляются вплоть до поверхности земли. В связи с этим представляет опасность повышенная естественная и наведенная сейсмичность территории, ожидается увеличение числа оползней в прибрежных районах, провалов, ведущих к разрыву и деформации подводных нефтепроводов, причем это характерно как для сейсмоактивных, так и тектонически неактивных (спокойных) регионов /139/.

Для решения проблем нефтяного комплекса в настоящее время активно применяются данные дистанционного зондирования (аэрофотосъемка и данные спутниковой съемки). Дистанционное зондирование Земли производится как с самолетов, так и со спутников, на борту которых установлены фотографические камеры. Широкие возможности дистанционного зондирования позволяют обеспечить космический мониторинг земель различного плана, в том числе с участками добычи и системой транспортировки нефти.

Известно, что чем удаленнее месторождение от промышленных потребителей, тем дороже транспортировка нефти и выше вероятность аварийных ситуаций для магистральных трубопроводов. Поэтому важное значение имеют результаты дистанционных наблюдений за ситуацией на трубопроводах.

В работе /149/ проведен анализ возможностей применения космических аэроснимков серии «Космос» для решения задач мониторинга состояния магистральных трубопроводов и их объектов (одной из задач является определение масштабов крупных аварий на магистральных подводных нефтепроводах). Периодичность наблюдения за магистральными трубопроводами в зависимости от поставленной задачи и используемых спутниковых систем может составлять до пяти сеансов в сутки. Оперативность доставки информации зависит от типа используемых спутниковых систем и от способа приема информации (при наличии станции приема спутниковой информации или при возможности доступа к информации со станций возможна работа в реальном режиме времени).

Карты геоструктурного и экологического содержания, составленные с использованием космических снимков, отображая особенности геологической структуры, помогают разработать природоохранные мероприятия.

Таким образом, существующая спутниковая аппаратура для дистанционных наблюдений позволяет решать следующие задачи:

- крупномасштабный мониторинг состояния подводных переходов нефтепроводов и их объектов;
- уточнение карт труднодоступных районов, где проходят подводные нефтепроводы;
- своевременное обнаружение мест утечек углеводородных продуктов на подводных переходах магистральных нефтепроводов /149/.

Основные задачи по соблюдению мер экологической безопасности на участках подводных переходов нефтепроводов. На сегодняшний день эксплуатируется большое количество подводных переходов магистральных нефтепроводов, многие из которых имеют большой срок эксплуатации и требуют выполнения мероприятий, направленных на повышение их эксплуатационной надежности, в связи с этим перед обслуживающими организациями ставятся следующие задачи:

- сохранение природной среды в зоне размещения подводных переходов нефтепроводов, рациональное использование природных ресурсов в зонах их эксплуатации;
- обеспечение промышленной и экологической безопасности строительства и эксплуатации нефтепроводов /150/;
- проведение мероприятий по охране окружающей среды подводных нефтяных переходов и оценка степени риска их строительства;
- разработка и применение новых технологий для предотвращения аварийных ситуаций в районах подводных переходов;
- умение быстро реагировать, локализовывать аварийные разливы нефти, ликвидировать их последствия;
- изучение причин аварий, выявление потенциально опасных мест, осуществление комплекса профилактических мер по предупреждению аварий на участках подводных переходов нефтепроводов /144/.

Влияние аварий на экологическую обстановку участков подводных переходов трубопроводов. Одним из наиболее опасных веществ, загрязняющих среду обитания, является нефть – сложный комплекс веществ, состоящий из 3 000 ингредиентов, большинство из которых легкоокисляемы. Поэтому чрезвычайно обширно токсическое воздействие нефти и нефтепродуктов на растения и живые организмы.

Частота и объемы аварийных разливов нефти на участках подводных переходов трубопроводов различны, и, как следствие, различны последствия загрязнения природной среды.

В связи с решением проблемы борьбы с аварийными выбросами нефти нами рассматриваются экологические последствия разливов нефти на поверхность грунтовой среды (почвы), болот и воды.

Попадая на поверхность почвы участков пойм (затапливаемых в период половодья), нефть стекает в пониженные участки, впитывается в почву и грунт, просачивается (фильтруется) в нижние горизонты, частично испа-

ряется. Из литературных источников известно, что на сухих участках легкие фракции нефти проникают в почву на глубину 10–20 см за время от 10 мин до 2 ч, а в нижние горизонты – за 2–3 месяца /153/. На болотистых участках нефть проникает на глубину до 0,2–0,5 м, на сухоходольных участках – на глубину до нескольких метров. Более тяжелые фракции интенсивнее сорбируются в верхних горизонтах почв, низкомолекулярные компоненты мигрируют в более глубокие горизонты и легче проникают в грунтовые воды /154/.

В первые сутки аварийных разливов нефти происходит интенсивное испарение легких и наиболее токсичных для живых организмов фракций, вследствие чего количество находящейся на поверхности нефти уменьшается на 30–40%. Оставшаяся нефть состоит из более тяжелых и менее подвижных фракций, поэтому в дальнейшем уменьшение объема разлитой нефти замедляется. На участках, загрязненных нефтью, в первые дни после загрязнения происходит гибель растений, гибель комплекса почвенных беспозвоночных, перестройка сообщества почвенных микроорганизмов. Естественное восстановление растительного покрова и комплекса почвенных животных происходит в течение 8–10 лет, однако и через 15–20 лет видовой состав растений оказывается беднее, чем на незагрязненных землях. На увлажненных почвах естественное восстановление протекает быстрее, чем на сухих /154/.

Другим важным фактором является способность нефти, особенно ее легких фракций, с большой скоростью растекаться по поверхности воды, образуя тонкую пленку большой площади. Вследствие этого разливы нефти на воде считаются более опасными, чем на почве, где она до определенной степени удерживается частицами почвы /155, 156/.

Отличительная особенность разливов нефти и нефтепродуктов – их скоротечность. Время – существенный фактор, способный в значительной степени повлиять на масштабы причиненного природе и людям ущерба.

Разливы нефти на поверхности воды экологически наиболее опасны в силу быстрого распространения их на большие территории в виде пленок различной толщины. Данные лабораторных исследований свидетельствуют о том, что первоначально в поверхностном слое сосредотачивается до 80–90% всей нефти. Одновременно с образованием пленки и началом испарения летучих углеводородов начинается захват нефти турбулентным речным потоком из пленки. В дальнейшем количество нефтепродуктов в воде уменьшается за счет процессов биохимического и химического окисления, а также осаждения /147/.

Нефтяные пленки на поверхности водных объектов нарушают тепловой и кислородный обмены между водным объектом и атмосферой, что приводит к изменению баланса кислорода в атмосфере и толще воды. Нефть препятствует естественной аэрации и нарушает биологические процессы в водоемах, изменяет состав воды. Особенно велико отрицательное действие нефти и вторичного загрязнения водоемов в результате нарушения и пре-

кращения жизнедеятельности флоры в северных регионах из-за пониженной самоочищаемости водоемов и слабой устойчивости почвенно-растительного покрова. В условиях загрязнения нефтью замедляется рост водорослей и других питательных сред для рыб. Осевшая на дно нефть вызывает вторичное загрязнение водоемов, что приводит к гибели флоры и фауны.

Негативное воздействие на природную среду оказывает и легковоспламеняющаяся способность нефти. В результате разлива нефти и ее воспламенения возможно поражение людей. Основными поражающими факторами в этом случае будут термическое излучение и отравление продуктами горения нефти. Вероятность взрыва облака паров нефти с воздухом незначительна.

Расчеты показывают, что при загорании разлившейся нефти термическая радиация негативно воздействует на постройки и людей на расстоянии до 60–80 м от края разлива. По этому критерию большинство населенных пунктов находятся вне зоны прямого огневого воздействия. Однако при горении нефти выделяется значительное количество токсичных газов: сернистый ангидрид, двуокись азота и угарный газ. Поэтому при авариях подобного рода требуется разработка мероприятий по защите населения ближайших населенных пунктов.

Природоохранные мероприятия на участках подводных переходов трубопроводов (при пересечении затопливаемых пойм и русла водотоков). Основным условием хозяйственной и производственной деятельности, допустимой к осуществлению на участках подводных переходов трубопроводов внутри водоохранных зон, является строгое соответствие решениям и технологиям, заложенным в проектах. Все сооружения в водоохранной зоне и предусмотренные природоохранные мероприятия должны обеспечивать экологическую безопасность эксплуатации трубопроводов.

Анализ разработанных нами проектных документов природоохранного назначения, а также нормативной, технической и обзорной литературы показал, что для предупреждения возможных аварий на участках подводных переходов трубопроводов необходимо предусматривать следующее:

- ввод в эксплуатацию объектов и сооружений при наличии системы противоаварийных мер (противоаварийные мероприятия должны разрабатываться и осуществляться в соответствии с Водным кодексом Российской Федерации /3/, «Положением о водоохранных зонах...» /128/ и разработанными для исследуемой территории проектов водоохранных зон), меры предупреждения и ликвидации аварийного загрязнения водных объектов согласовываются органами госнадзора и учреждениями государственной санитарно-эпидемиологической службы и утверждаются в установленном порядке;
- осуществление производственно-хозяйственной деятельности на участках перехода трубопроводов через водотоки при наличии лицензий на водопользование, в которых устанавливаются требования по соблюдению водоохранного режима в пределах прибрежных защитных полос;

- установку водоохранных знаков на границах прибрежных защитных полос, в местах переходов трасс трубопроводов через водотоки как напоминание о необходимости соблюдения технологии эксплуатации с целью предотвращения загрязнения водных объектов;

- запрет на размещение в водоохраных зонах строительных площадок, стоянок, заправок ГСМ, ремонта и мойки строительной техники;

- пересечение водоохранной зоны трассами трубопроводов производится по нормали к направлению долины или под небольшим углом, но с таким расчетом, чтобы избежать скопления и застоя воды перед трассой (устройством пойменных водопропускных отверстий), и с креплением русла;

- подземную укладку трубопроводов;

- обеспечение минимизации замутнения воды и вымывания донных осадков разработкой подводных траншей при переходах трубопроводов через водотоки в период межени при низких стоках и минимальных скоростях течения;

- проведение прокладки трубопроводов повышенной прочности;

- обеспечение защиты трубопроводов на подводных переходах от почвенной коррозии антикоррозийным покрытием (например, изоляция полимерными лентами в два слоя ленты и два слоя обертки);

- прокладку трубопроводов на переходах через водные преграды в траншеи на глубину не менее 1 м от естественных отметок дна водотока до верха образующей трубы способом протаскивания предварительно зафуртованной трубы;

- выполнение засыпки траншей с превышением над уровнем поверхности земли для восстановления естественных отметок рельефа после естественного уплотнения грунта засыпки;

- обеспечение сброса сточных вод после промывки трубопроводов в водные объекты только после их очистки в установленном порядке;

- исключение захламления русел водотоков порубочными остатками, строительными отходами и мусором;

- проведение противозрозийных и берегоукрепительных работ, рекультивацию технологических проездов вдоль трасс трубопроводов;

- залужение прибрежной водоохранной полосы многолетними травами после окончания строительства трубопроводов;

- оборудование участков перехода трубопроводами водотоков задвижками с автоматическим приводом, обеспечивающими автоматическое отключение участков трубопровода в случае аварии (обеспечивающее минимальные потери);

- установку предохранительных пружинных клапанов, срабатывающих при повышении давления в трубопроводе выше расчетного, со сбросом жидкой фазы в специальную емкость;

- отключение насосных агрегатов при порыве нефтепроводов;

- сигнализацию о состоянии технологического оборудования и об отклонении параметров работы от номинальных значений;

- 100% контроль швов сварных соединений трубопроводов;
- установление стационарных боновых заграждений на водотоках, пересекаемых трубопроводами;
- организацию мониторинга за коррозионным состоянием трубопроводов;
- проведение планово-предупредительного ремонта эксплуатируемого оборудования;
- выполнение своевременной локализации аварийных разливов токсичных загрязнителей и ликвидации последствий аварий;
- создание специально обученного подразделения по ликвидации аварий и их последствий.

2.2. Инженерно-геологический мониторинг участков подводных переходов трубопроводов (участков перехода затопляемой поймы и русла водотоков)

При эксплуатации подводных переходов трубопроводов (участков перехода затопляемой поймы и русла водотоков) должен предусматриваться производственный контроль за состоянием геологической среды вдоль трасс трубопроводов. Для выполнения контроля разрабатывается и утверждается программа ведения инженерно-геологического мониторинга подводных переходов трубопроводов, где излагаются требования к выполнению производственного экологического мониторинга.

Выбор мест наблюдений. По нашему мнению, в рамках ведомственного контроля инженерно-геологическому мониторингу трубопроводов подлежат участки возможного негативного техногенного воздействия трубопроводов на геологическую среду в местах перехода трассами водотоков.

Инженерно-геологический мониторинг трубопроводов выполняется в составе работ по техническому обслуживанию и ремонту в охранной зоне линейной части трубопроводов.

Устройство нефтепроводов предусмотрено подземной прокладкой трубопроводов параллельно рельефу местности глубиной не менее 0,8 м от поверхности земли до верха образующей трубы.

Охранной зоной вдоль трасс трубопроводов являются участки земли, ограниченные условными линиями, проходящими в 25 м от оси трубопроводов с каждой стороны; вдоль подводного перехода – участки водного пространства от водной поверхности до дна, заключенные между параллельными плоскостями, отстоящими от осей крайних ниток переходов на 100 м с каждой стороны. Охранные зоны трубопроводов отмечаются на местности опознавательными знаками высотой 1,5–2 м от поверхности земли в пределах видимости, но не реже, чем через 500 м и на углах поворота. В охранной зоне нефтепроводов запрещаются всякие действия, мо-

гущие нарушить нормальную эксплуатацию трубопроводов или привести к их повреждению /157/.

Негативное антропогенное воздействие на геологическую среду оказывают трассы трубопроводов при пересечении берегов рек (сложных грунтами, которые подвергаются размыву при нарушении почвенно-растительного покрова) и подводном переходе водотоков (подверженных деформациям русла), приводящих к овражной и русловой эрозии, способствующей провисанию трубопроводов и угрозе их разрыва /158/. По нашему мнению, участки возможного негативного воздействия трасс трубопроводов на геологическую среду подлежат инженерно-геологическому мониторингу.

В пределах трассы нефтепроводов инженерно-геологическому мониторингу трубопроводов подлежат участки пересечения трассами трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек.

Объекты наблюдения и наблюдаемые показатели. Объекты наблюдения и наблюдаемые показатели инженерно-геологического мониторинга геологической среды участков перехода трассами трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек представлены в табл. 2.1.

В организационном плане выполнение инженерно-геологического мониторинга трубопроводов состоит из трех этапов: подготовительного, полевого и камерального.

В подготовительный период производится сбор и изучение имеющейся технической документации (планы и профили трасс, материалы технических изысканий) по трассам трубопроводов.

Т а б л и ц а 2.1.

Объекты наблюдения и наблюдаемые показатели на участках инженерно-геологического контроля геологической среды

Объекты наблюдения	Наблюдаемые показатели	Периодичность наблюдений
Участки пересечения трассами трубопроводов берегов рек	Эрозионные процессы в пределах нарушаемых строительством трассы трубопровода участков берегов рек	1 раз в год после весеннего снеготаяния
Участки подводного перехода трубопроводами рек	Деформации русла рек на участках подводных переходов трубопроводов	1 раз в год после весеннего половодья
Участки пересечения трассами трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек	Техническое состояние трубопроводов	1 раз в год после весеннего половодья

В полевой период проводятся:

- закрепление реперов для наблюдения за эрозионными процессами на нарушенных строительством трубопроводов участках берегов рек;
- выполнение топографо-маркшейдерской съемки с проложением теодолитного и нивелирного ходов, рубкой визирок и отысканием пунктов государственной геодезической сети на участках пересечения трассами трубопроводов берегов рек;
- наблюдения за деформациями русла рек на участках подводных переходов трубопроводами (проведением рекогносцировки участков перехода, разбивкой промерных створов, определением планово-высотного положения трубопроводов, проведением гидрологических работ по замеру уровней воды и скорости течения) /159/;
- осмотр технического состояния трубопроводов на участках пересечения трассами трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек для выявления и анализа негативного влияния геологической среды на условия эксплуатации трубопроводов и выдачи рекомендаций по инженерной защите трубопроводов от разрушающего воздействия неблагоприятных инженерно-геологических процессов.

В камеральный период проводится обработка и анализ данных полевого обследования и составление отчетных материалов по результатам инженерно-геологического мониторинга геологической среды трубопроводов для составления пояснительной записки в составе ежегодного отчета о техническом состоянии линейной части трубопроводов.

Наблюдения за эрозионными процессами на участках пересечения трассами трубопроводов склонов логов и долин рек. По нашим наблюдениям, нарушение почвенно-растительного покрова при строительстве трасс трубопроводов на участках пересечения берегов рек способствует развитию линейной эрозии (овражной).

Линейная эрозия (овражная) во время снеготаяния и ливневых дождей на нарушенных трассами трубопроводов берегах рек может привести к образованию вдоль профилей трасс первой стадии развития оврагов – образованию промоин или рытвин /160/. На первой стадии развития овраги имеют линейную форму с треугольным поперечным профилем. Глубина промоин достигает 1,5 м и приводит к оголению трубопроводов. Несвоевременное устранение незначительных размывов и оголений трубопроводов способствует развитию вдоль профилей трубопроводов второй стадии оврагов – формированию вершинного перепада глубиной до 2 м (склоны оврагов становятся крутыми, интенсивно углубляется их дно), что может привести к провисанию трубопроводов и угрозе их разрыва /158/.

По профилю перехода трасс трубопроводов берегов рек во время технического обследования трубопроводов предусматривается закрепление реперов для наблюдения за эрозионными процессами в пределах нарушенных (строительством трасс трубопроводов) участков в границах охранной зоны трубопроводов /159, 161/.

Наблюдения за деформациями русла рек на участках подводных переходов трубопроводов крупных рек. По нашим наблюдениям, все деформации русел рек делятся на два вида: горизонтальные (боковая эрозия), связанные с перемещением русла в плане; и вертикальные, обусловленные трансформацией продольного профиля реки. Горизонтальные деформации русла рек связаны с гидравлическими характеристиками потока, вертикальные деформации – с процессами выравнивания транспортирующей силы потока.

Контроль горизонтальных и вертикальных деформаций русла рек на участках подводных переходов трубопроводов необходим в целях предупреждения изменения условий эксплуатации трубопроводов, связанных с их оголением и провисанием.

Наблюдения за горизонтальными и вертикальными деформациями русла рек на участках подводных переходов трубопроводов проводится сопоставлением результатов промера глубин во время технического обслуживания трубопроводов по профилю перехода трасс с исполнительным профилем промера глубин, выполняемым во время строительства, перед укладкой трубопроводов /159/.

В камеральный период по осям трубопроводов составляются продольные профили по всем ниткам переходов. На профили наносятся промерные вертикали, расстояния между ними, отметки верха грунта над трубой, отметки верхней образующей трубы, глубины рек на каждой промерной вертикали. При наличии провиса трубопроводов отмечается их величина от нижней образующей трубы до грунта.

Определение характеристик русловых форм на участках перехода (прогнозирование скорости перемещения затопляемых мезоформ речного русла, прогнозирование плановых деформаций, расчет характеристик русловых микроформ) производится в соответствии с ВСН 163-83 «Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов» /162/.

Наблюдения за техническим состоянием трубопроводов. Мероприятия по техническому обслуживанию участков подводных переходов трубопроводов включают: наружный осмотр трубопроводов с целью контроля за состоянием охранной зоны (воздушное патрулирование с целью обнаружения утечек нефти по выходу на поверхность; выявление оголений, размывов, оползней; обследование состояния переходов трубопроводов через реки, овраги, ручьи с отбором проб речной воды выше и ниже перехода). Мероприятия по техническому обслуживанию участков подводных переходов трубопроводов предусматриваются согласно РД 39-132-94 /163/. Контроль технического надзора выполняет служба технического надзора, химико-аналитическая лаборатория управления подготовки нефти и газа /164/.

Контролирующими организациями являются Госгортехнадзор, экологическая служба Росприроднадзора, Верхнеобьрыбвод.

По нашему мнению, в рамках инженерно-геологического мониторинга трубопроводов наблюдения за техническим состоянием трубопроводов на

участках пересечения трассами трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек должна проводить организация, выполняющая инженерно-геологические работы, с целью контроля возможного разрушающего воздействия инженерно-геологических процессов на состояние берегоукреплений, изоляционного покрытия трубопроводов и обнаружения оголенных участков (их протяженности), наличия подмывов и провиса труб.

Наблюдения за техническим состоянием трубопроводов на участках негативного влияния инженерно-геологических процессов включают:

- осмотр береговых участков рек;
- осмотр русловых участков подводных переходов трассами трубопроводов рек.

В результате осмотра технического состояния трубопроводов на участках негативного воздействия инженерно-геологических процессов составляется заключение об изменении условий эксплуатации трубопроводов с рекомендациями о сроках и методах ремонтных работ.

Результаты инженерно-геологического мониторинга участков пересечения трассами трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек включаются в общие пояснительные записки ежегодных отчетов о техническом состоянии линейной части трубопроводов линейно-эксплуатационных служб трубопроводов под руководством главного инженера нефтедобывающего предприятия /159/.

По результатам инженерно-геологического мониторинга участков перехода трассами трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек для инженерной защиты трубопроводов от разрушающего воздействия неблагоприятных инженерно-геологических процессов в пояснительной записке даются рекомендации:

- по благоустройству участков перехода (планировке берегов, организации поверхностного стока, восстановлению растительного покрова);
- по проведению берегоукрепительных работ;
- по устройству противодеформационных и берегоукрепительных мероприятий в соответствии с характером и интенсивностью наблюдаемых инженерно-геологических процессов.

Ежегодный технический отчет линейно-эксплуатационной службы трубопроводов нефтедобывающего предприятия об обследовании линейной части трубопроводов, включающий материалы инженерно-геологического мониторинга участков перехода трассами берегов рек и подводных переходов рек, направляется главному инженеру нефтедобывающего предприятия.

Организация службы локального (объектного) инженерно-геологического мониторинга подводных переходов трубопроводов. Инженерно-геологический мониторинг участков перехода трубопроводов берегов рек и подводных переходов рек выполняется в составе мероприятий технического обслуживания и ремонта трубопроводов /159, 160/.

Техническое обслуживание объектов линейной части трубопроводов выполняется персоналом баз аварийно-восстановительного пункта линей-

но-эксплуатационной службы трубопроводов нефтедобывающего предприятия.

Для выполнения инженерно-геологического мониторинга участков перехода трубопроводами берегов рек и подводных переходов рек должны приглашаться специализированные организации, имеющие лицензию на выполнение инженерно-геологических и инженерно-геодезических работ.

По результатам технического обследования состояния трубопроводов в соответствии с утвержденными планами и объемами работ проводится капитальный ремонт объектов линейной части специализированными подразделениями ремонтно-строительных управлений.

Контроль за техническим обслуживанием и ремонтом, состоянием и функционированием объектов линейной части трубопроводов возлагается на руководство линейно-эксплуатационных служб трубопроводов и главного инженера нефтедобывающего предприятия.

Проведение инженерно-геологического мониторинга подводных переходов трубопроводов позволит снизить риск возникновения аварийных ситуаций и воздействие на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Третий аналитический сборник полностью посвящен вопросам охраны водных ресурсов, а именно вопросам исследования болотных массивов и проблеме подводных переходов нефтепроводов.

В современных условиях наиболее совершенным и объективным способом исследования болотных массивов является использование аэрокосмической информации и методов дешифрирования снимков.

В представленном аналитическом сборнике рассмотрены дистанционные методы изучения микроландшафтов зоны выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот. В качестве основного метода изучения микроландшафтов рассмотрено дешифрирование.

Дешифрирование аэрофото- и космических снимков позволит надежно выделить территорию и определить тип болотного массива, установить границы и закономерности распределения болотных микроландшафтов, характер и размеры элементов внутриболотной гидрографической сети, определить направления движения болотных вод.

Оценка состояния водных объектов и экологической ситуации при пересечении трубопроводов и инженерно-геологический мониторинг участков подводных переходов – проблема мирового масштаба. Инженерно-геологический мониторинг позволит решить следующие задачи, связанные с охраной окружающей природной среды:

- наблюдение за состоянием водных систем;
- выявление и оценка неблагоприятных тенденций в состоянии водных ресурсов, прогноз дальнейшего состояния водных объектов.

Представленный в третьем сборнике материал систематизирован на основе данных по дешифрированию и данных программ мониторинга, полученных в ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК» за более чем десятилетнюю практику проведения работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, К. Е. Гидрология болот / К. Е. Иванов. – Л. : Гидрометеиздат, 1953. – 296 с.
2. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – Введ. 1975-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 34 с.
3. Водный кодекс Российской Федерации : принят Гос. Думой 12 апр. 2006 г. : офиц. текст по состоянию на 1 июня 1998 г. – М. : НОРМА, 1998. – 87 с.
4. Галкина, Е. А. Болотные ландшафты и принципы их классификации / Е. А. Галкина // Научные работы Ботанического института им. В.Л. Комарова АН СССР (за 1941–1943 гг.). – Ленинград, 1946. – С. 139–156.
5. Иванов, К. Е. Основы гидрологии болот лесной зоны и расчеты водного режима болотных массивов / К. Е. Иванов. – Л. : Гидрометеиздат, 1957. – 500 с.
6. Иванов, К. Е. Водообмен в болотных ландшафтах / К. Е. Иванов. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
7. Цинзерлинг, Ю. Д. Растительность болот / Ю. Д. Цинзерлинг // Растительность СССР. – 1938. – Т. 1. – С. 355–425.
8. Галкина, Е. А. Черты сходства и отличия между классификацией торфяных месторождений и классификацией болотных урочищ / Е. А. Галкина // Учен. зап. Тартуского гос. ун-та. – 1963. – Т. 7, Вып. 145. – С. 35–46.
9. Галкина, Е. А. Болотные ландшафты Карелии и принципы их классификации. Торфяные болота Карелии / Е. А. Галкина // Тр. Карельского филиала АН СССР. – 1959. – Вып. 15. – С. 3–48.
10. Богдановская-Гиенэф, И. Д. Закономерности формирования сфагновых болот верхового типа на примере Полисто-Ловатского массива / И. Д. Богдановская-Гиенэф. – Л. : Наука, 1969. – 186 с.
11. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим / под ред. К. Е. Иванова, С. М. Новикова. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 447 с.
12. Боч, М. С. Типы болот тундровой зоны / М. С. Боч // Продуктивность биоценозов Субарктики. – Свердловск, 1970. – С. 40–45.
13. Боч, М. С. Болота Ямала / М. С. Боч, Т. В. Герасименко, Ю. С. Толчельников // Ботан. журн. – 1971. – Т. 56, № 10. – С. 1421–1435.
14. Пьявченко, Н. И. Бугристые торфяники / Н. И. Пьявченко. – М. : Изд-во АН СССР, 1955. – 280 с.
15. Пьявченко, Н. И. Некоторые типы болот и заболоченных лесов Тюменской области / Н. И. Пьявченко // Тр. Ин-та леса. – 1955. – Т. 26. – С. 97–123.
16. Галкина, Е. А. Использование аэрофотоснимков для установления закономерностей распределения болотных урочищ (различных классов и групп типов) по территории лесной зоны СССР / Е. А. Галкина // Труды IX Всесоюзного совещания по аэрофотосъемке. – Л. : Наука, 1967. – С. 329–336.

17. Шумилова, Л. В. Болотные регионы Западной Сибири в пределах Тюменской области / Л. В. Шумилова // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. – 1969. – Вып. 23. – С. 31–40.
18. Бронзов, А. Я. Верховые болота Нарымского края (бассейн р. Васюган) / А. Я. Бронзов // Тр. науч.-исслед. торф. ин-та. – 1930. – Вып. 3. – 92 с.
19. Бронзов, А. Я. Гипновые болота на южной окраине Западно-Сибирской равнинной тайги / А. Я. Бронзов // Почвоведение. – 1936. – № 2. – С. 224–245.
20. Тюремнов, С. Н. Районирование торфяных месторождений / С. Н. Тюремнов // Торфяные месторождения Западной Сибири. – М., 1957. – С. 129–141.
21. Романова, Е. А. Краткая ландшафтно-морфологическая характеристика болот Западно-Сибирской низменности / Е. А. Романова // Тр. Гос. гидрол. ин-та. – 1965. – Вып. 126. – С. 96–112.
22. Романова, Е. А. Некоторые морфологические характеристики олиготрофных болотных микроландшафтов Западно-Сибирской низменности как основа типологического районирования / Е. А. Романова // Природа болот и методы их исследований. – Л. : Наука, 1967. – С. 63–67.
23. Романова, Е. А. Ландшафтно-морфологическая характеристика болот в бассейне р. Конды (Западно-Сибирская низменность) / Е. А. Романова // Тр. Гос. гидрол. ин-та. – 1967. – Вып. 145. – С. 27–51.
24. Романова, Е. А. Геоботаническая и краткая гидрологическая характеристика болотных ландшафтов водораздела рек Вах и Ватинский Еган Западной Сибири / Е. А. Романова, Л. И. Усова // Тр. Гос. гидрол. ин-та. – 1969. – Вып. 157. – С. 98–122.
25. Львов, Ю. А. К характеристике Иксинского водораздельного болота / Ю. А. Львов // Изв. Том. отд.-ния ВБО. – 1959. – Т. 4. – С. 59–62.
26. Львов, Ю. А. Некоторые особенности строения растительного покрова Сеченского болота Новосибирской области / Ю. А. Львов // Изв. СО АН СССР. – 1961. – № 4. – С. 113–115.
27. Львов, Ю. А. Растительность Васюганского района / Ю. А. Львов // Природа и экономика Привасюганья. – Томск : Изд-во ТГУ, 1966. – С. 190–201.
28. Растительный покров торфяных болот Среднего Приобья и закономерности его размещения / Г. Г. Куликова и др. // Вестн. МГУ. Биология и почвоведение. – 1971. – № 2. – С. 51–60.
29. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. д. б. н. профессора В. Б. Куваева. – Тула : Гриф и К^о, 2001. – 584 с.
30. Яснопольская, Г. Г. К характеристике растительности и торфяной залежи Васюганского болота / Г. Г. Яснопольская // Учен. зап. Том. гос. ун-та им. В. В. Куйбышева. – 1965. – № 51. – С. 49–63.
31. Лапшина, Е. И. Геоботаническое картографирование таежной зоны Западной Сибири / Е. И. Лапшина // Геоботаническое картографирование. – Л. : Наука, 1973. – С. 49–60.
32. Ильина, И. С. Обзорное картографирование растительности поймы р. Оби / И. С. Ильина // Сиб. геогр. сб. – 1976. – № 2. – С. 161–182.
33. Растительный покров Западно-Сибирской равнины / И. С. Ильина и др. – Новосибирск, 1985. – 249 с.
34. Принципы составления обзорной «Карты растительности Западно-Сибирской равнины» / И. С. Ильина и др. // Геоботаническое картографирование. – Л. : Наука, 1977. – С. 41–58.
35. Структура растительного покрова западной части Большого Васюганского болота (на примере ключевого участка «Узас») / Е. Д. Лапшина и др. // Сиб. экол. журн. – 2000. – № 5. – С. 563–567.

36. Лапшина, Е. Д. Флора болот юго-востока Западной Сибири / Е. Д. Лапшина. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. – 296 с.
37. Васюганское болото. Природные условия, структура и функционирование / под ред. Л. И. Инишевой. – Томск : Том. ЦНТИ, 2003. – 190 с.
38. Романова, Е. А. Геоботанические основы гидрологического изучения верховых болот (с использованием аэрофотосъемки) / Е. А. Романова. – Л. : Гидрометеоиздат, 1961. – 244 с.
39. Иванов, К. Е. Основы гидрологии болот лесной зоны / К. Е. Иванов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1957. – 500 с.
40. Иванов, К. Е. Эрозионные явления на болотах и их роль в формировании озерно-болотных ландшафтов Западной Сибири / К. Е. Иванов // Тр. Гос. гидрол. ин-та. – 1969. – Вып. 157. – С. 78–97.
41. Романова, Е. А. Методика составления типологических карт болот с использованием материалов аэрофотосъемки для гидрологического изучения болотных ландшафтов / Е. А. Романова // Тематическое картографирование в СССР. – Л. : Наука, 1967. – С. 108–111.
42. Романова, Е. А. Дешифрирование аэрофотоснимков и составление крупномасштабных типологических карт болот Западной Сибири / Е. А. Романова // Крупномасштабное картографирование растительности. – Новосибирск : Наука, 1970. – С. 118–123.
43. Логинов, П. Е. О работах Западно-Сибирской торфоразведочной экспедиции / П. Е. Логинов // Сб. статей по изучению торфяного фонда. – 1957. – Вып. 2. – С. 15–31.
44. Логинов, П. Е. Разведка торфяных месторождений в районах Западно-Сибирской низменности / П. Е. Логинов // Сб. статей по изучению торфяного фонда. – 1958. – Вып. 3. – С. 10–21.
45. Елизарьева, М. Ф. Схема геоботанического районирования междуречья Оби-Енисея / М. Ф. Елизарьева // Учен. зап. Краснояр. пед. ин-та. – 1959. – Т. 15. – С. 28–33.
46. Шумилова, Л. В. Проблема ботанико-географического районирования и опыт ее решения на примере Западной и Средней Сибири / Л. В. Шумилова // Итоги исследований по биологии 1917–1967 гг. Том. гос. ун-та им. В.В. Куйбышева. – Томск. – 1968. – С. 174–187.
47. Кузьмина, М. С. Принципы типологии Барабы / М. С. Кузьмина // Изв. Новосибир. отд-ния геогр. о-ва СССР. – 1957. – Вып. 1. – С. 23–32.
48. Лисс, О. Л. К районированию торфяных болот Томской области / О. Л. Лисс, Г. Г. Куликова // Вестн. МГУ. Биология и почвоведение. – 1967. – № 4. – С. 87–91.
49. Львов, Ю. А. Методические материалы к типологии и классификации болот Томской области / Ю. А. Львов // Типы болот СССР и принципы их классификации. – Л. : Наука, 1974. – С. 188–194.
50. Дементьев, В. А. Опыт геоморфологического районирования Западно-Сибирской низменности / В. А. Дементьев // Изв. геогр. о-ва. – 1940. – Т. 72, вып. 3. – С. 306–314.
51. Мазинг, В. В. Классификация элементов гидрографической сети верховых болот / В. В. Мазинг // Учен. зап. Тартуского ун-та. – 1964. – Вып. 145. – С. 253–257.
52. Романова, Е. А. Классификация элементов поверхностной гидрографической сети на болотах / Е. А. Романова // Тр. Гос. гидрол. ин-та. – 1953. – Вып. 39/93. – С. 60–80.

53. Лопатин, В. Д. О гидрологическом значении верховых болот / В. Д. Лопатин // Вестн. ЛГУ. – 1949. – № 2. – С. 37–49.
54. Иванов, К. Е. О фильтрации в поверхностном слое выпуклых болотных массивов / К. Е. Иванов // Метеорология и гидрология. – 1948. – № 2. – С. 46–59.
55. Романов, В. В. Гидрофизика болот / В. В. Романов. – Л. : Гидрометеиздат, 1961. – 359 с.
56. Савельева, Т. С. Структура речных водосборов в болотных ландшафтах / Т. С. Савельева. – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 144 с.
57. Иванов, К. Е. Сток с системы верховых болотных массивов / К. Е. Иванов // Тр. Гос. гидр. ин-та. – 1949. – Вып. 13 (67). – С. 5–11.
58. Лундин, К. П. Водные свойства торфяной залежи / К. П. Лундин. – Минск : Урожай, 1964. – 211 с.
59. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып.8 : Гидрометеорологические наблюдения на болотах. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 296 с.
60. Воробьев, П. К. Исследование физических характеристик деятельного горизонта неосушенных болот / П. К. Воробьев // Тр. Гос. гидр. ин-та. – 1965. – Вып. 126. – С. 65–96.
61. Иванов, К. Е. Метод изучения гидрологического режима болотных массивов на основе использования количественных связей гидрологических элементов с растительным покровом / К. Е. Иванов. – Л. : Изд-во Ботанического ин-та АН СССР, 1954. – 46 с.
62. Иванов, К. Е. Основы теории морфологии болот и гидроморфологические зависимости / К. Е. Иванов // Тр. Гос. гидр. ин-та. – 1965. – Вып. 126. – С. 5–47.
63. Иванов, К. Е. Структура и рельеф природных (болотных) ландшафтов в нефтяных районах Западной Сибири / К. Е. Иванов, С. Н. Вассерман, С. М. Новиков // Тр. Главтюменьнефтегаза и Гипротюменьнефтегаза. – 1974. – Вып. 33. – С. 27–48.
64. Борсук, О. А. Речные системы как пример разомкнутых геокомплексов / О. А. Борсук // Методы комплексного изучения природы. – М. : Наука, 1973. – С. 18–22.
65. Корытный, Л. М. Речной бассейн как геосистема / Л. М. Корытный // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. – 1974. – Вып. 42. – С. 33–37.
66. Нежиховский, Р. А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды / Р. А. Нежиховский. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 476 с.
67. Чеботарев, Н. И. Учение о стоке / Н. И. Чеботарев. – М. : Изд-во МГУ, 1962. – 406 с.
68. Булавко, А. Г. Водный баланс речных водосборов / А. Г. Булавко. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 264 с.
69. Исаченко, А. Г. Система основных понятий современного ландшафтоведения / А. Г. Исаченко // География и современность. – Л., 1982. – С. 17–50.
70. Винер, Н. Кибернетика / Н. Винер. – М. : Наука, 1983. – 343 с.
71. Савельева, Т. С. Структура внутриболотных водосборов / Т. С. Савельева // Вестн. ЛГУ. – 1979. – № 18. – С. 79–84.
72. Бавина, Л. Г. Анализ влияния заболоченности водосбора на максимальный сток весеннего половодья для территории центральной и южной частей Западно-Сибирской равнины / Л. Г. Бавина, Т. А. Цветанова // Тр. Гос. гидр. ин-та. – 1983. – Вып. 303. – С. 63–75.
73. Вери, Э. Влияние верховых болот на распределение речного стока с малых водосборов / Э. Верри, Дон Г. Болтер // Труды международного симпозиума по гидрологии заболоченных территорий. – Минск, 1973. – С. 35–41.

74. Черный, Л. Б. Порождение мер связи между объектами с помощью мер связи между признаками / Л. Б. Черный // Проблемы анализа дискретной информации. – Новосибирск, 1975. – С. 67–174.
75. Смирнов, Л. Е. Аэрокосмические методы географических исследований / Л. Е. Смирнов. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1975. – 303 с.
76. Королев, Ю. К. Как подойти к обработке снимков? / Ю. К. Королев // ARCREVIEW. – 1999. – № 4. – С. 2–3.
77. Баранов, Ю. А. Программное обеспечение для обработки данных дистанционного зондирования / Ю. А. Баранов, Ю. К. Королев, С. А. Миллер // Первый Всероссийский учебно-презентационный семинар «Геоинформатика в нефтегазовой отрасли» (13–17 апр. 1998 г., г. Москва). – М., 1998. – С. 38–46.
78. Журкин, И. Г. Геоинформационное моделирование в ГИС при обработке данных дистанционного зондирования / И. Г. Журкин, В. Я. Цветков // Исслед. Земли из космоса. – 1998. – № 6. – С. 40–51.
79. Савиных, В. П. Интеграция технологий ГИС и систем обработки данных дистанционного зондирования Земли / В. П. Савиных, В. Я. Цветков // Там же. – 2000. – № 2. – С. 83–86.
80. Белов, В. В. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений / В. В. Белов, С. В. Афонин. – Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2005. – 266 с.
81. Афонин, С. В. Направления развития и результаты пассивного спутникового зондирования системы «атмосфера – земная поверхность» в Институте оптики атмосферы СО РАН / С. В. Афонин, В. В. Белов // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 12. – С. 1031–1041.
82. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Перспективы. Проблемы : аналит. обзор / ред. В. В. Белов. – Новосибирск, 2003. – 135 с.
83. Особенности теплового поля в районе Большого Васюганского болота / И. И. Ипполитов и др. // География и природ. ресурсы. – 2005. – № 3. – С. 51–61.
84. Исследование структуры лесоболотных комплексов Васюганской равнины с использованием ГИС, дистанционных и подспутниковых данных / М. Н. Алексеева и др. // Там же. – 2004. – № 2. – С. 71–77.
85. Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под общ. ред. чл.-корр. РАН М. В. Кабанова. – Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2002. – 230 с.
86. Киенко, Ю. П. Структура космической съемки изучения природных ресурсов Земли / Ю. П. Киенко // Исслед. Земли из космоса. – 1980. – № 2. – С. 76–83.
87. Киенко, Ю. П. Дистанционное зондирование Земли из космоса и тематическое картографирование в СССР : межрегион. курсы ООН по темат. картографированию (Москва – Душанбе, 5 сент.–7 окт. 1983 г.) : лекция / Ю. П. Киенко. – М., 1983. – 27 с.
88. Киселев, В. В. Межотраслевая обработка космической информации : межрегион. курсы ООН по темат. картографированию (Москва – Душанбе, 5 сент.–7 окт. 1983 г.) : лекция / В. В. Киселев. – М., 1983. – 14 с.
89. Дистанционное зондирование. Количественный подход / под ред. Ф. Свейна, Ш. Дейвис. – М. : Недра, 1983. – 415 с.
90. Книжников, Ю. Ф. Основы аэрокосмических методов в географических исследованиях / Ю. Ф. Книжников. – М. : МГУ, 1980. – 137 с.
91. Космические методы изучения среды. Автоматизированный аэрокосмический практикум / под ред. А. П. Капицы, Ю. Ф. Книжникова. – М. : МГУ, 1990. – 144 с.

92. Campbell, J. B. Introduction to Remote Sensing, 2nd Ed. / J. B. Campbell. – N.Y. : Guilford Press, 1996. – 622 p.
93. Jensen, J. R. Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective, 2nd Ed. / J. R. Jensen. – N.Y. : Prentice Hall, 1996. – 318 p.
94. ERDAS Field Guide, 5nd Ed. ERDAS Inc. – Atlanta, Georgia, 1999. – 672 p.
95. Schowengerdt, R. A. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing / R. A. Schowengerdt. – San Diego : Academic Press, 1997. – 522 p.
96. Применение материалов аэрофотосъемки для гидрографического изучения болот / Е. А. Галкина и др. // Тр. Гос. гидрол. ин-та. – 1949. – Вып. 13/67. – С. 5–25.
97. Брюханов, А. В. Аэрокосмические методы в географических исследованиях / А. В. Брюханов, Г. В. Господинов, Ю. Ф. Книжников. – М. : Изд-во МГУ, 1982. – 230 с.
98. Виноградов, Б. В. Изучение болотных систем по многоспектральным космическим снимкам / Б. В. Виноградов // Тр. Гос. гидрол. ин-та. – 1980. – Вып. 276. – С. 83–92.
99. Аэрокосмические методы исследования природной среды (на примере болот) / Е.А. Галкина и др. // Аэрокосмические методы в исследовании окружающей среды. – Л., 1980. – С. 106–120.
100. Иванов, К. Е. Озерно-болотные системы и их устойчивость при преобразовании избыточно увлажненных территорий / К. Е. Иванов // Учен. зап. ЛГУ. – 1974. – № 376. – С. 5–81.
101. Чечкин, С. А. Водно-тепловой режим неосушенных болот и его расчет / С. А. Чечкин. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 205 с.
102. Шебеко, В. Ф. Испарение с болот и баланс почвенной влаги / В. Ф. Шебеко. – Минск : Урожай, 1985. – 394 с.
103. Комплекс дистанционных методов при геологическом картографировании таежных районов. – Л. : Недра, 1978. – 247 с.
104. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – М. : Издат. центр «Академия», 2004. – 336 с.
105. Кудрицкий, Д. М. Основы гидрографического дешифрирования аэрофотоснимков / Д. М. Кудрицкий, И. В. Попов, Е. А. Романова. – Л. : Гидрометеиздат, 1956. – 344 с.
106. Указания по расчетам стока с неосушенных и осушенных верховых болот. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 84 с.
107. Иванов, К. Е. Применение аэрофотосъемки при гидрологических расчетах водного режима болот / К. Е. Иванов // Тр. лаборатории аэрометодов. – 1959. – Т. 7. – С. 226–229.
108. Гидрологические расчеты при осушении болот и заболоченных земель / под ред. К. Е. Иванова. – Л. : Гидрометеиздат, 1963. – 447 с.
109. Лабутина, И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков : учеб. пособие для студентов вузов / И. А. Лабутина. – М. : Аспект Пресс, 2004. – 184 с.
110. Лурье, И. К. Теория и практика обработки изображений / И. К. Лурье, А. Г. Косиков // Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М. : Науч. мир, 2003. – 168 с.
111. Серапинас, Б. Б. Основы теории картографических проекций / Б. Б. Серапинас. – М. : МГУ, 1988. – 142 с.
112. Берлянт, А. М. Картография / А. М. Берлянт. – М. : Аспект Пресс, 2001. – 336 с.

113. Серапинас, Б. Б. Математическая картография / Б. Б. Серапинас. – М. : Academia, 2005. – 336 с.
114. Герасимов, Ю. Ю. Геоинформационные системы : Обработка и анализ растровых изображений / Ю. Ю. Герасимов, С. А. Кильпелайнен, А. П. Соколов. – М. : ООО «Дата+», 2002. – 118 с.
115. Кравцова, В. И. Космические методы исследования почв : учеб. пособие для студентов вузов / В. И. Кравцова. – М. : Аспект Пресс, 2005. – 190 с.
116. Кравцова, В. И. Цветовой синтез космических снимков для разделения открытых почв лесостепной зоны / В. И. Кравцова, В. А. Пиотровский // Геоинформатика. – 2004. – № 3. – С. 7–13.
117. Компьютерный практикум по цифровой обработке изображений и созданию ГИС // Дистанционное зондирование и географические информационные системы / И. К. Лурье и др. – М. : Науч. мир, 2004. – 148 с.
118. Лурье, И. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы: учеб. пособие. Ч. 1. Основы геоинформатики и создание ГИС / И. К. Лурье. – М. : ООО «ИНЭКС 92», 2002. – 140 с.
119. Markham, B. L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures / B. L. Markham, J. L. Barker ; EOSAT Landsat Data User Notes, Lanham (USA), 1986. – 8 p.
120. Экология Севера : дистанционные методы изучения нарушенных экосистем (на примере Кольского полуострова) / под ред. А. П. Капицы, У. Г. Риса. – М. : Науч. мир, 2003. – 248 с.
121. Бутусов, О. Б. Алгоритмы текстурной классификации типов лесов на основе анализа космических снимков с ИСЗ «LANDSAT-7» / О. Б. Бутусов // Исслед. Земли из Космоса. – 2002. – № 5. – С. 87–96.
122. Mather, P. M. Computer processing of remotely sensed images: an introduction. 2 nd Ed. / P. M. Mather. – N.Y. : Wiley, 1999. – 352 p.
123. Richards, J. A. Remote Sensing Digital Image Analysis / J. A. Richards. – Berlin : Springer-Verlag, 1993. – 250 p.
124. Hord, R. M. Digital Image Processing of Remotely Sensed Data / R. M. Hord. – N.Y. : Academic Press, 1982. – 230 p.
125. Космические методы изучения среды. Автоматизированный аэрокосмический практикум / под ред. А. П. Капицы, Ю. Ф. Книжникова. – М. : МГУ, 1990. – 144 с.
126. Серапинас, Б. Б. Основы спутникового позиционирования / Б. Б. Серапинас. – М. : МГУ, 1998. – 84 с.
127. Серапинас, Б. Б. Глобальные системы позиционирования / Б. Б. Серапинас – М. : ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.
128. Положение о водоохранных зонах водных объектов и их прибрежных защитных полосах : утв. Постановлением Правительства Российской Федерации 23.11.96 № 1404 // Собр. законодательства РФ. – 1996. – № 49. – Ст. 5567.
129. Водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы поверхностных водных объектов Лугинецкого нефтегазоконденсатного месторождения ОАО «Томскнефть» ВНК (Парабельский район Томской области) : отчет о НИР / Том. науч.-исслед. и проект. ин-т нефти Вост. нефт. компании. – М., 2005. – № 0320.0 502446 от 02 июня 2005 г.
130. Проекты водоохранных зон и прибрежных защитных полос поверхностных водных объектов.) : отчет о НИР / Том. науч.-исслед. и проект. ин-т нефти Вост. нефт. компании. – М., 2005. – № 0120.0 502746 от 06 апреля 2005 г.

131. К вопросу установления водоохранных зон систем верховых болотных массивов / А. Г. Гендрин и др. // Человеческое измерение регионального развития. Экология, экологическое образование и воспитание : тез. докл. науч.-практ. конф. – Нижневартовск, 2005. – С. 50–52.
132. О методике установления водоохранных зон для верховых болотных массивов с использованием данных дистанционного зондирования и ERDAS IMAGINE / А. Г. Гендрин и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – № 8. – С. 735–739.
133. Gendrin, A. G. Application of GIS technologies and Remote Sensing Data to determination of water-protection zone borders / A. G. Gendrin, V. P. Kolmogorov, Yu. P. Mylnikov // International Forum CONSERVANCY OF NATURE (Congress and exhibition) (September 6–8, 2005, Moscow). – М. : MAXIMA Inc., 2005. – Р. 442–443.
134. Методика установления водоохранных зон для верховых болот на территориях нефтяных и газовых месторождений / А. Г. Гендрин и др. // Нефть. хоз-тво. – 2006. – № 8. – С. 94–97.
135. Антипов, А. Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории / А. Н. Антипов, В. Н. Федоров. – Новосибирск : Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2000. – 250 с.
136. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – Т. 15, вып. 2. – 406 с.
137. Иванов, К. Е. Гидрологическая роль торфяников СССР / К. Е. Иванов, С. М. Новиков // Гидрологическая роль торфяных месторождений и использование их в сельском хозяйстве. – Минск : Наука, 1981. – С. 20–24.
138. Седых, В. Н. Экологически опасные зоны на лесу – болотных территориях нефтегазового комплекса Западной Сибири / В. Н. Седых // Нефть. хоз-во. – 2002. – № 3. – С. 104–106.
139. Курочкин, В. В. Бестраншейные методы прокладки нефтепроводов / В. В. Курочкин, Н. Т. Овчинников, А. А. Безверхов // Трубопровод. транспорт нефти. – 2000. – № 5. – С. 25–30.
140. Баканова, Т. А. «Приволжскнефтепровод»: экологическая безопасность – приоритетная цель / Т. А. Баканова // Там же. – 2001. – № 12. – С. 14–16.
141. Андреев, А. А. Технические решения по обустройству вдольтрассовых защитных сооружений. / А. А. Андреев, В. А. Лизунов, В. С. Михалев // Там же. – 2001. – Прил. к № 6. – С. 5–7.
142. Сутормин, В. Л. Оперативная связь при нештатных ситуациях на нефтепроводах / В. Л. Сутормин, Л. Г. Токтаева // Там же. – 2001. – Прил. к № 6. – С. 21–27.
143. Ерёмин, М. Н. Оценка риска и управление безопасностью территорий региона / М. Н. Ерёмин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 268 с.
144. Ерёмин, М. Н. Прогноз, оценка и управление авариями на трубопроводном транспорте / М. Н. Ерёмин. – Оренбург : Изд-во ОГУ, 2000. – 222 с.
145. Ерёмин, М. Н. Разработка системного подхода к оценке, прогнозу и ликвидации чрезвычайных экологических ситуаций, возникших при авариях на магистральных трубопроводах Оренбургской области : дис. ... канд. техн. наук / М. Н. Ерёмин. – Оренбург, 1998. – 268 с.
146. Проблемы предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на море и водных бассейнах России // Сборник материалов научно-технической конференции. Ч. 1. – СПб., 1995. – 144 с.
147. Попов, Ю. В. Опыт работы «Черномортранснефти» по ликвидации последствий аварийных разливов нефти / Ю. В. Попов // Трубопроводный транспорт нефти. – 2001. – № 8. – С. 29–31.

148. Груздев, А. А. Повышение надежности и экологической безопасности подводных переходов магистральных нефтепроводов в ОАО «Верхневолжскнефтепровод» / А. А. Груздев, Л. А. Талаушкин, С. А. Самойленко // Там же. – 1999. – № 9. – С. 14–15.
149. Кирилин, А. Н. Космические технологии для трубопроводного транспорта / А. Н. Кирилин, Н. П. Родин, Ю. Е. Паламарчук // Там же. – 2000. – № 11. – С. 15–17.
150. Радченко, Е. Я. Экологическая безопасность должна стать нормой / Е. Я. Радченко // Там же. – 2001. – № 5. – С. 27–29.
151. Гринько, В. С. Техническое состояние линейной части магистрального нефтепровода и резервуарных парков. Планы приведения их к нормативному состоянию / В. С. Гринько, А. С. Горин // Там же. – 2001. – № 6. – С. 17–20.
152. Разработка регламента по эксплуатации и обслуживанию подводных переходов трубопроводов, а также ликвидация возможных аварий / ОАО «ТомскНИПИ-нефть ВНК». – 2001.
153. Балашов, А. Л. Моделирование загрязнения верхнего почвенного слоя углеводородами / А. Л. Балашов, В. М. Максимов // Основные направления в решении проблем экологического риска топливно-энергетического комплекса. – М. : ВНИИ природ. газов и газовых технологий (ВНИИГАЗ), 1994. – С. 43–49.
154. Солнцева, Н. П. Общие закономерности трансформации почв в районах добычи нефти (формы проявления, основные процессы, модели) // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем : сб. науч. тр. – М. : Наука, 1988. – С. 23–42.
155. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах. – М. : ВНИИГАЗ, 2000. – 56 с.
156. Бордунов, В. В. Очистка воды от нефти и нефтепродуктов / В. В. Бордунов, С. В. Бордунов, В. В. Леоненко // Экология и промышленность России. – 2005. – Август. – С. 8–11.
157. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Охрана окружающей среды : ВСН 014-89 / ВНИИСТ Миннефтегазстрой. – 1990. – 84 с.
158. Рельефообразование в лесоболотной зоне Западно-Сибирской равнины. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 242 с.
159. Инструкция по обследованию технического состояния подводных переходов магистральных нефтепроводов : РД 39-30-1060-84 / ВНИИСПТнефть. – 1991. – 98 с.
160. Положение о техническом обслуживании и ремонте линейной части магистральных нефтепроводов : РД 39-30-499-80 / ВНИИСПТнефть. – 1981. – 47 с.
161. Правила охраны магистральных трубопроводов. – М., 1992. – 16 с.
162. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов) : ВСН 163-83 / ВНИИСТ Миннефтегазстрой. – 1985. – 103 с.
163. Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов : РД 39-132-94. – М. : М-во топлива и энергетики Рос. Федерации, 1994. – 210 с.
164. Нормы на проектирование капитального ремонта подводных переходов магистральных нефтепроводов : РД 39-0147 103-370-86 / ВНИИСПТнефть. – 1987. – 115 с.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей работе приняты следующие обозначения и сокращения:

АФС – аэрофотоснимок;
ВЗ – водоохранная зона;
ГГИ – государственный гидрологический институт;
ГИС – геоинформационные системы;
ГК – главная компонента;
ДДЗ – данные дистанционного зондирования;
ДЗ – дистанционное зондирование;
ИК-зона – инфракрасная зона.
ИЭИ – инженерно-экологические изыскания;
КС – космический снимок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Гендрин Алексей Германович – заведующий отделом экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК», канд. физ.-мат. наук,
тел. (3822) 79-18-76,
e-mail: GendrinAG@nipineft.tomsk.ru
- Румянцева Галина Григорьевна – старший научный сотрудник отдела экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК»,
тел. (3822) 79-18-99,
e-mail: RumyantsevaGG@nipineft.tomsk.ru
- Колмогоров Валерий Павлович – старший научный сотрудник отдела экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК»,
канд. геогр. наук,
тел. (3822) 79-18-99,
e-mail: KolmogorovVP@nipineft.tomsk.ru
- Мыльников Юрий Петрович – младший научный сотрудник отдела экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК»,
тел. (3822) 79-19-97,
e-mail: MylnikovYP@nipineft.tomsk.ru
- Русинова Евгения Сергеевна – младший научный сотрудник отдела экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК»,
тел. (3822) 79-18-95,
e-mail: RusinovaES@nipineft.tomsk.ru
- Щеголихина Мария Павловна – младший научный сотрудник отдела экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК»,
тел. (3822) 79-18-99,
e-mail: ShegolikhinaMP@nipineft.tomsk.ru
- Квашнина Светлана Васильевна – младший научный сотрудник отдела экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК»,
тел. (3822) 79-18-99,
e-mail: KvashninaSV@nipineft.tomsk.ru
- Курганская Ульяна Владимировна – младший научный сотрудник отдела экологии ОАО «ТомскНИПИнефть ВНК»,
тел. (3822) 79-19-97,
e-mail: KurganskayaUV@nipineft.tomsk.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОЛАНДШАФТОВ ЗОНЫ ВЫПУКЛЫХ ОЛИГОТРОФНЫХ (СФАГНОВЫХ) БОЛОТ	4
1.1. Природный объект «болото» – термины и определения. Развитие болота. Классификация болот.....	4
1.2. Болотные ландшафты зоны выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот	7
1.3. Формирование стока на болотных массивах.....	11
1.4. Уровенный режим в зоне выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот	19
1.5. Водосборы внутриболотной гидрографической сети	21
1.6. Применение аэрокосмических снимков в исследованиях болотных массивов	25
1.6.1. Виды и методики визуального дешифрирования аэрокосмических снимков.....	28
1.6.2. Методы автоматизированного дешифрирования многозональных снимков.....	68
Глава 2. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА ПЛОЩАДКАХ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ, РАЗРАБОТКА ПЛАНА ЛИКВИДАЦИИ ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ НА НИХ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ.....	85
2.1. Оценка экологической ситуации на площадках подводных переходов трубопроводов	87
2.2. Инженерно-геологический мониторинг участков подводных переходов трубопроводов (участков перехода затопляемой поймы и русла водотоков)	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
ЛИТЕРАТУРА.....	100
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	109
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	110

Гендрин Алексей Германович
Румянцева Галина Григорьевна
Колмогоров Валерий Павлович
Мыльников Юрий Петрович
Русинова Евгения Сергеевна
Щеголихина Мария Павловна
Квашнина Светлана Васильевна
Курганская Ульяна Владимировна

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выпуск 3

Современные методы изучения болотных систем.
Регламентирование деятельности недропользователей
в условиях Западной Сибири

Аналитический обзор

Компьютерная верстка выполнена Т.А. Калужной

Лицензия ИД № 04108 от 27.02.01

Подписано в печать 10.05.2007. Формат 60х84/16.
Бумага писчая. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,8. Уч.-изд. л. 8,6. Тираж 300 экз.
Заказ № 189.

ГПНТБ СО РАН. Новосибирск, ул. Восход, 15, комн. 407, ЛИСА.
Полиграфический участок ГПНТБ СО РАН. 630200, Новосибирск,
ул. Восход, 15.