

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А. М. ОБУХОВА РАН

**Всероссийская конференция,
посвященная памяти академика
Александра Михайловича Обухова**

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ,
ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ
И КЛИМАТА**

10–12 ноября 2020 года
Сборник тезисов

**The Conference
dedicated to the memory of Academician
Alexander Mikhailovich Obukhov**

**TURBULENCE,
ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS**

**10–12 November 2020
Abstracts**

МОСКВА
ФИЗМАТКНИГА
2020

ББК 26.23
Т 864
УДК 551.5

Редколлегия:

*Г. С. Голицын, И. И. Мохов, С. Н. Куличков, О. Г. Чхетиани, И. А. Репина,
В. А. Семенов, В.А. Фалалеева*

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА. Все-
российская конференция, посвященная памяти академика Александра
Михайловича Обухова. 10–12 ноября 2020 года. Сборник тезисов докла-
дов. — М.: Физматкнига, 2020. — 184 с. ISBN 978-5-89155-340-8.**

**TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS. The Con-
ference dedicated to the memory of Academician Alexander Mikhailovich
Obukhov. 10–12 November 2020. Book of Abstracts. — Moscow:
Fizmatkniga Publisher, 2020. — 184 p. ISBN 978-5-89155-340-8.**

Научное издание

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ,
ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ
И КЛИМАТА

Всероссийская конференция,
посвященная памяти академика
Александра Михайловича Обухова

10–12 ноября 2020 года

Сборник тезисов докладов

Издательство «Физматкнига».

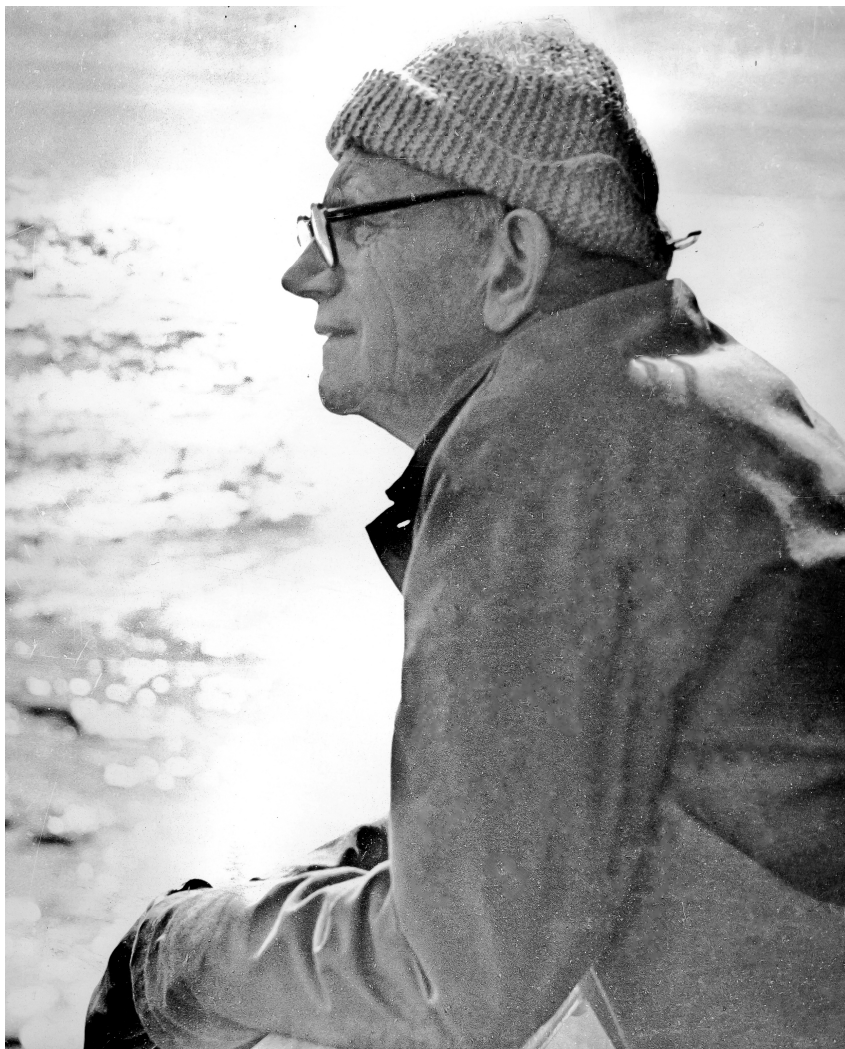
141701, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 3А.

Отпечатано в АО «Т8 Издательские технологии»
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5

Подписано в печать 02.11.2020.

Формат 60х90 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд.л. 13,0. Тираж 100 экз.



Александр Михайлович Обухов
5 мая 1918 г. – 3 декабря 1989 г.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Г. С. Голицын, академик, ИФА РАН – сопредседатель
И.И. Мохов, академик, ИФА РАН – сопредседатель
Р.М. Вильфанд, д.т.н., Гидрометеоцентр РФ
В.П. Дымников, академик, ИВМ РАН
Н.Ф. Еланский, чл.-корр. РАН, ИФА РАН
С.С. Зилитинкевич, д.ф.-м.н., ФМИ
М.А. Каллистратова, д.ф.-м.н., ИФА РАН
А.В. Кислов, д.г.н., МГУ им. М.В.Ломоносова
С.Н. Куличков, д.ф.-м.н., ИФА РАН
М. В. Курганский, д.ф.-м.н., ИФА РАН
В.Н. Лыкосов, чл.-корр. РАН, ИВМ РАН
А. А. Макоско, чл.-корр. РАН, Президиум РАН
Е.А. Мареев, чл.-корр. РАН, ИПФ РАН
М.Я. Маров, академик, ИПМ РАН
В.А. Семенов, чл.-корр. РАН, ИФА РАН
Ю.Д. Чашечкин, д.ф.-м.н., ИПМех РАН
О.Г. Чхетиани, д.ф.-м.н., ИФА РАН

Конференция проводится при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-05-22052.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

С. Н. Куличков, д.ф.-м.н., директор ИФА РАН – председатель

О.Г. Чхетиани, д.ф.-м.н., ИФА РАН – со-председатель

И.А. Репина, д.ф.-м.н., ИФА РАН – зам. председателя

М.В. Курганский, д.ф.-м.н., ИФА РАН

В.А. Семенов, зам. директора, ИФА РАН

И.Н. Белова, к.ф.-м.н., ИФА РАН

А.Ю. Артамонов, ИФА РАН

М.С. Артамонова, ИФА РАН

В.В. Орлова, ИФА РАН

Е.И. Федорова, ИФА РАН

В.А. Фалалеева, ИФА РАН

А.В. Чернокульский, к.ф.-м.н., ИФА РАН

А.И. Скороход, к.г.н., ИФА РАН

Субмезомасштабные структуры в приземном слое атмосферы по данным минисодара высокого разрешения

Вазаева Н.В.^{1,2}, Чхетиани О.Г.¹, Крамар В.Ф.¹, Каллистратова М.А.¹, Кузнецов Р.Д.^{1,3}, Люлюкин В.С.¹, Зайцева Д.В.¹, Кузнецов Д.Д.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³Финский метеорологический институт, Хельсинки, Финляндия

vazaevanv@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, стрики, спиральность, частотный спектр, акустическое зондирование, минисодар высокого разрешения

Субмезомасштабные – от десятков секунд до минут и от десятков до сотен метров – вихревые структуры постоянно существуют в атмосферном пограничном слое (АПС), где всегда имеется значительный вертикальный сдвиг скорости ветра. В сечении, параллельном поверхности, эти структуры, называемые стриками, выглядят как чередование полос низкой и высокой скорости движения, вытянутых в направлении средней скорости ветра. Образование стриков связывается с развитием немодальных возмущений в стратифицированном экмановском слое.

Экспериментальные исследования характерных пространственно-временных масштабов стриков и значений их спиральности, а также визуализация тонкой структуры поля скорости проводились методом акустического зондирования с помощью доплеровского трехкомпонентного минисодара высокого разрешения (ВРМС). Измерения проходили в летний период 2017-2019 гг. на Цимлянской научной станции на высотах 2-45 м с разрешением 1 м по высоте и 1 с по времени. ВРМС фиксирует стрики с основным крупным временным масштабом 5-10 мин. и соответствующим пространственным масштабом 300-500 м, определяемым через среднюю скорость ветра, переносящего структуры.

Плотность спиральности в стриках по результатам проведенных измерений составляет 0,5-4 м/с². Частотные спектры вертикальной компоненты скорости, измеренные с помощью акустического анемометра Gill Wind Master Pro HS Part 1951-РК-020 и с помощью ВРМС, хорошо коррелируют между собой в области совпадения масштабов. Результаты измерений показывают, что на малых частотах спектр имеет наклон, близкий к -1, а при увеличении частоты – к -5/3.

Стрики необходимо учитывать в схемах параметризаций АПС, поэтому данные об их масштабах и динамических характеристиках представляют большой интерес. Их уверенная и детальная дистанционная регистрация в приземном слое, где ранее акустическое зондирование ограничивалось техническими возможностями содаров, стала возможной благодаря ВРМС.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 19-05-01008, 19-05-50110.

Распределение Максвелла и стохастический ансамбль конвективных сферических термиков случайного радиуса

Вульфсон А.Н.^{1,2}, Бородин О.О.¹

¹*Институт водных проблем Российской академии наук*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
longines1812@yandex.ru*

Ключевые слова: ансамбль конвективных термиков, распределение Максвелла, ансамбль быстрых броуновских частиц, уравнение Ланжевена, уравнение Фоккера-Планка

Турбулентная конвекция в пограничном слое атмосферы сопровождается развитием стохастического ансамбля конвективных термиков [1]. Согласно [1] стохастический ансамбль конвективных термиков реализуется как в форме сферических пузырей, так и в форме нестационарных струй. В работе [2] ансамбль сферических термиков рассматривался как система плавучих вихрей с фиксированным детерминированным радиусом. В работе [3] и настоящем докладе ансамбль сферических термиков рассматривается как система плавучих вихрей со случайными радиусами, изменяющимися с высотой.

В предложенной модели ансамбля уравнение движения термика дополнено случайной силой, пропорциональной белому шуму Гаусса. Полученное стохастическое уравнение для случайной вертикальной скорости термиков подобно уравнению Ланжевена, известному для ансамбля «быстрых» броуновских частиц, см. [4].

Описание ансамбля термиков со случайными скоростями предполагает задание плотности вероятности распределения термиков по скоростям. Дополнение стохастического уравнения Ланжевена параметром интерпретации Стратоновича приводит к ассоциированному кинетическому уравнению Фоккера-Планка. Равновесное распределение Максвелла по скоростям построено как стационарное решение уравнения Фоккера-Планка. Продемонстрировано соответствие обобщенного распределения Максвелла с известными экспериментальными данными.

Литература:

1. Vulfson N.I. // Program for Scientific Translation. Jerusalem-Washington. 1964. 188 p.
2. Вульфсон А.Н. Бородин О.О. // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. №. 2. С. 113–124.
3. Vulfson A.N., Borodin O.O. // Physics of Fluids 2018. V. 30, 095103
4. Климонтович Ю.Л. // Успехи физических наук. 1994. Т. 164. №. 8. С. 811–844.

Композитные спектры и случайные процессы со стационарными приращениями

Голицын Г.С., Фортус М.И.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

gsg@ifaran.ru

Ключевые слова: методы, случайные процессы, структурные функции, спектры, атмосферная турбулентность, различные природные процессы.

Доклад посвящен методике получения и интерпретации фрактальных геофизических процессов со степенными спектрами различной природы. Примерами являются спектры энергии атмосферных процессов и их роль в перемешивании примесей, частотные спектры морских ветровых волн, пространственные спектры рельефа поверхностей небесных тел Солнечной системы. По эмпирическим структурным функциям — результатам статистической обработки данных по скорости в эксперименте Европейского проекта MOZAIC [1] — получены композитные спектры, состоящие из двух степенных участков: один соответствует спектру Колмогорова-Обухова $k^{-5/3}$, второй спектру геострофической турбулентности Чарни k^{-3} . Эти спектры согласуются с эмпирическими спектрами, представленными в [2], а также со спектрами, воспроизведенными в модели высокого разрешения на различных высотах не только тропосферы, но и стратосферы, и мезосферы [3]. На основании данных MOZAIC получена формула для коэффициента относительной вихревой турбулентной диффузии (коэффициента перемешивания) $K(r)$. Эта формула неплохо согласуется с точками Ричардсона, полученными в разные времена и для разных высот. Представлен обзор работ по данной тематике. Отмечается важнейшее значение для приложений работ А.Н. Колмогорова начала 1930-х гг., получивших впоследствии развитие в работах его учеников А.М. Обухова, А.С. Мониной, А.М. Яглома и др. Вероятностные законы Колмогорова служат в качестве модели для анализа изучаемых процессов методами теории подобия и размерности [4].

Литература:

1. Lindborg E. Can the atmospheric kinetic energy spectrum be explained by two-dimensional turbulence? // J. Mech. 1999. V. 388. P.259.
2. Nastrom G. D., Gage K. S. A climatology of atmospheric wave-number spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft // J. Atmos. Sci. 1984. V. 42. No.4. P. 950.
3. Koshyk J. N., Hamilton R. The horizontal kinetic energy spectrum and spectral budget simulated by a troposphere-stratosphere-mesosphere GCM. // J. Atmos. Sci. 2001. V. 58. No. 4.
4. Голицын Г.С., Фортус М.И. Случайные процессы со стационарными приращениями и композитные спектры. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. №4.

Сальтация в турбулентной атмосфере

**Горчаков Г.И.¹, Карпов А.В.¹, Копейкин В.М.¹, Мирсаитов С.Ф.², Гушин Р.А.^{1,2}, Даченко О.И.^{1,2},
Бунтов Д.В.^{1,2}, Курбатов Г.А.^{1,3}**

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия*

³*МГУ им. М.В. Ломоносова Физический факультет, Москва, Россия*

gengor@ifaran.ru

Ключевые слова: климат, опустынивание, ветропесчаный поток, сальтация, турбулентность, конвекция

Поступающий в атмосферу с опустыненных территорий пылевой аэрозоль прямо и косвенно влияет на радиационный режим атмосферы на региональном и глобальном масштабах. Значительная часть пылевого аэрозоля генерируется на подстилающей поверхности под воздействием сальтирующих алевритовых и песчаных частиц. По данным измерений на опустыненной территории в Астраханской области восстановлена функция распределения сальтирующих частиц по размерам [1, 2]. Изучены закономерности изменчивости вертикальных распределений концентраций алевритовых и песчаных частиц при вариациях скорости ветра в приземном слое атмосферы. Показано, что на интенсивность сальтации сильно влияют конвективные структуры в пограничном слое атмосферы. Выполнен анализ вариаций параметров турбулентности в приземном слое атмосферы на опустыненной территории в период проведения измерений характеристик ветропесчаного потока в условиях квазинепрерывной сальтации, а также анализ взаимосвязей параметров турбулентности с концентрацией сальтирующих частиц. По данным измерений турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра с высоким временным разрешением оценена вероятность переноса в приземном слое атмосферы частиц алевритовой фракции ветропесчаного потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19- 05 – 00758).

Литература:

1. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гушин Р.А., Даченко О.И. Алевритовая фракция сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. № 2. С. 193-196.
2. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гушин Р.А., Даченко О.И. Влияние ветра на распределение сальтирующих частиц по размерам. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 848–855

Вертикальные потоки аэрозоля: методика измерений, автоматизированный аппаратный комплекс, предварительные результаты измерений на опустыненной территории

Горчаков Г.И.¹, Карпов А.В.¹, Курбатов Г.А.¹, Гушин Р.А.^{1,2}, Бунтов Д.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

gengor@ifaran.ru

Ключевые слова: опустынивание, эмиссия пылевого аэрозоля, турбулентный поток аэрозоля, методика измерений, автоматизированный аппаратный комплекс, турбулентные пульсации, концентрация частиц аэрозоля, компоненты скорости ветра, скорость выноса аэрозоля

С опустыненных территорий в атмосферу выносятся пылевой аэрозоль, который заметно влияет на радиационный режим атмосферы в глобальном масштабе. Процесс выноса пылевого аэрозоля недостаточно изучен, что обусловлено, в частности, редким использованием прямых измерений вертикальных турбулентных потоков пылевого аэрозоля [1,2].

Создан новый автоматизированный аппаратный комплекс для измерений на опустыненных территориях вертикальных турбулентных потоков и скорости выноса пылевого аэрозоля в приземный слой атмосферы. Разработана программно-алгоритмическое обеспечение для системы регистрации и предварительной обработки данных измерений. Проведены испытания аппаратного комплекса.

По данным выполненным ранее измерений проанализированы турбулентные пульсации трех компонент скорости ветра и концентрации пылевого аэрозоля в приземном слое атмосферы. Охарактеризованы квазипериодические вариации скорости ветра, обусловленные появлением конвективных структур в пограничном слое атмосферы. Получены предварительные оценки влияния конвективных структур на турбулентные потоки пылевого аэрозоля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-17-00214).

Литература:

1. Gorchakov G.I., Koprov B.M., Shukurov K.A. Vertical Turbulent Aerosol Fluxes over Desertized Areas // Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics. 2002. V. 38. Suppl. 1. P. S138-S147.
2. Gorchakov G.I., Koprov B.M., Shukurov K.A.. Arid submicron aerosol transport by vortices // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2003. V. 39. No 5. P. 536-547.

Вертикальное распределение сальтирующих алевритовых и песчаных частиц

Гущин Р.А.^{1,2}, Горчаков Г.И.¹, Карпов А.В.¹, Даценко О.И.^{1,2}, Бунтов Д.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

gushchin@ifaran.ru

Ключевые слова: опустынивание, ветропесчаный поток, сальтация, распределение частиц по размерам, алевритовая фракция, вертикальный профиль, влияние ветра

В августе 2011 г. на опустыненной территории в Астраханской области с помощью фотоэлектрического счетчика [1] были выполнены измерения функции распределения сальтирующих частиц по размерам [2]. Получены средние вертикальные распределения концентраций алевритовых и песчаных частиц для условий квазинепрерывной сальтации по данным измерений 23.08.2011 в период с 12:05 до 15:05, включая распределения концентраций частиц с размерами 47, 106 и 156 мкм в диапазоне высот от 3 до 15 см. Указанные распределения аппроксимируются экспоненциальными профилями с логарифмическими градиентами – 0.30, -0.315 и -0.347 см⁻¹, что свидетельствует о более быстром убывании с высотой концентраций песчаных частиц по сравнению с концентрациями алевритовых частиц. Показано, что скорость ветра заметно влияет на профили суммарной, а также дифференциальных счетных концентраций алевритовых и песчаных частиц в верхнем слое сальтации. С увеличением скорости ветра в верхнем слое сальтации скорость изменения концентраций замедляется, что обусловлено возрастающим влиянием турбулентности в верхнем слое сальтации. Определены логарифмические градиенты концентраций сальтирующих частиц для значений скорости ветра 6.0, 7.5 и 9.0 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-05-00758).

Литература:

1. Бунтов Д.В., Гущин Р.А., Даценко О.И. Четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок // Оптика атмосферы и океана 2018. Т 31. № 6. С. 485–488.
2. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гущин Р.А., Даценко О.И. Влияние ветра на распределение сальтирующих частиц по размерам. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 10. С. 848–855

Функция распределения сальтирующих частиц по размерам на опустыненной территории

Даценко О.И.^{1,2}, Горчаков Г.И.¹, Карпов А.В.¹, Гушин Р.А.^{1,2}, Бунтов Д.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

datsenko@ifaran.ru

Ключевые слова: опустынивание, сальтация, алевритовая фракция, песчаная фракция, распределение частиц по размерам, параметры логонормальных аппроксимаций, вертикальные профили

Проанализированы результаты измерений с помощью фотоэлектрического счетчика [1] функции распределения сальтирующих частиц по размерам на опустыненной территории в Астраханской области 23.08.2011 в период с 12:05 по 15:05 в условиях квазинепрерывной сальтации [2]. Для осредненных функций распределения частиц по размерам в нижнем и верхнем слоях сальтации получены аппроксимации суммой двух логонормальных распределений для алевритовой и алеврит-песчаной фракций. Получены вертикальные профили параметров аппроксимирующих логонормальных распределений. Предложены аппроксимации вертикальных профилей указанных параметров. В частности, модальный диаметр частиц алеврит-песчаной фракции аппроксимируется экспоненциальной функцией высоты, а параметр, характеризующий полуширину распределения этой фракции – линейной функцией высоты. С увеличением высоты от 3 до 15 см модальный диаметр алеврит-песчаной фракции уменьшается от 110 до 100.5 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19- 05 – 00758).

Литература:

1. Бунтов Д.В., Гушин Р.А., Даценко О.И. Четырехканальный фотоэлектрический счетчик сальтирующих песчинок // Оптика атмосферы и океана 2018. Т 31. № 6. С. 485-488.
2. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гушин Р.А., Даценко О.И. Алевритовая фракция сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. № 2. С. 193-196

Исследование параметризаций вертикальной турбулентной диффузии, используемых в моделях общей циркуляции атмосферы и океана

Дебольский А.В.^{1,2}, Мортиков Е.В.^{1,3}, Глазунов А.В.^{3,1}, Лыкосов В.Н.^{1,3}

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва Россия
and.debol@srce.msu.ru

Ключевые слова: *boundary layer turbulence*

В докладе обсуждается оценка воспроизведения турбулентного перемешивания в пограничном слое атмосферы и океана. Рассматриваются замыкания нулевого и первого порядка, а также $k-\varepsilon$ и $k-1$ замыкания, используемые в современных моделях прогноза погоды и климата.

Показано, что основные ошибки в воспроизведении устойчиво-стратифицированных пограничных слоев связаны с определением турбулентных масштабов длины и времени или скорости диссипации кинетической энергии турбулентности. Предложено релаксационное уравнение относительно волнового числа для полуэмпирических замыканий геофизической турбулентности. Численные эксперименты показывают, что такой подход при задании равновесного состояния согласованного с теорией подобия Монина-Обухова позволяет точнее воспроизвести основные характеристики слабо-нестационарных устойчиво-стратифицированных пограничных слоев. Допускается возможность уточнения замыкания за счет задания равновесных состояний и релаксационных соотношений по данным прямого и вихреразрешающего моделирования. Традиционное уравнение для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности можно рассматривать как аппроксимацию предложенного релаксационного уравнения для устойчиво-стратифицированных течений, находящихся в состоянии квази-равновесия. Такая связь позволяет соотнести выбор эмпирических констант в уравнении для скорости диссипации с заданием равновесного состояния и релаксационного временного масштаба.

Оценена роль функций устойчивости, используемых в параметризации турбулентного перемешивания, в частности влияние нелинейной части соответствующих безразмерных градиентов скорости и температуры на результаты моделирования. Проанализирована связь между определяемой ими зависимостью турбулентного числа Прандтля от устойчивости и воспроизводимыми замыканием характеристиками ПС.

Оценка производилась с использованием обширного набора данных численных экспериментов с DNS (прямое числовое моделирование), LES (моделирование больших вихрей) моделями, а так же данных наблюдений и лабораторных экспериментов. Представлена разрабатываемая вычислительная технология, Технология включает реализацию замыканий, используемых в распространенных моделях атмосферы и океана; дополняется данными измерений, прямого и вихреразрешающего моделирования для их верификации; обеспечивает возможность расширения набора турбулентных замыканий и баз данных для сравнения как разработчиками технологии, так и ее пользователями. Предлагаемая технология позволяет упростить постановку и решение исследовательских задач о динамике пограничных слоев, ускорить разработку новых моделей и может быть востребована сообществом разработчиков глобальных океанских и атмосферных моделей для независимой проверки процедур турбулентного переноса.

Данная работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ 20-05-00776 А и гранта РНФ 18-47-06203.

Интенсификация турбулентного перемешивания в верхнем слое вод восточно-атлантического сектора Северного Ледовитого океана, как возможный новый механизм Полярного усиления

Иванов В.В.^{1,2}, Поляков И.В.³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Арктический и антарктический научно исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

³Международный Арктический научный центр университета Аляски, Фербенкс, США
vladimir.ivanov@aari.ru

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, полярное усиление, обратные с связи, турбулентное перемешивание, течения, морской лед, конвекция в океане

Сокращение площади арктического морского льда и его утоньшение инициировало усиление обратных связей, которые в условиях преобладания толстого, сплоченного льда либо вообще не проявлялись, либо были незначимыми. Применительно к поверхности океана, частично покрытого льдом, положительная обратная связь в летний сезон реализуется через «альбедный механизм», объясняемый многократным различием между отражательной способностью льда и воды. Термодинамическое действие альбедного механизма может быть усилено динамическим форсингом, способным, при определенных условиях, обеспечить интенсивное перемешивание вод поверхностного слоя с нижележащими более теплыми и солеными водами атлантического происхождения [1]. При типичном для второй половины 20-го века круглогодичном ледяном покрове на большей части Северного Ледовитого океана (СЛО) и сильной плотностной стратификации, основным механизмом передачи тепла из атлантического слоя к поверхности была малоэффективная двойная диффузия. В докладе представлены результаты многолетнего мониторинга термохалинного и динамического состояния верхнего 1000-метрового слоя в восточно-атлантическом секторе СЛО, показавшего тренд на ослабление плотностной стратификации, совпадающий с увеличением скорости течений и их вертикального сдвига [2]. Повышенный сдвиг скорости течений вместе с ослаблением стратификации указывает на возрастание потенциала сдвиговой турбулентности и конвективного перемешивания, как механизмов, создающих благоприятные предпосылки для переноса тепла из промежуточного слоя к нижней поверхности ледяного покрова. Сокращение площади и уменьшение толщины морского льда, вызванное этими процессами, очевидно ведет к их дополнительному усилению, т.е. формированию положительной обратной связи «лед – океан» [3]. Действие этой обратной связи способно ускорить текущую потерю морского льда или замедлить скорость восстановления ледяного покрова в восточно-атлантическом секторе СЛО, в случае изменения современных климатических трендов.

Литература:

1. Ivanov V.V., Repina I.A., 2019: Mid-winter anomaly of sea ice in the Western Nansen Basin in 2010s. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 231 012024; doi:10.1088/1755-1315/231/1/012024
2. Polyakov, I. V., and Coauthors, 2020: Weakening of Cold Halocline Layer..... J. Clim., 33, 8107–8123, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0976.1>.
3. Polyakov, I. V., and Coauthors, 2020: Intensification of near-surface currents Geophys. Res. Lett., 46,e2020GL089469. <https://doi.org/10.1029/2020GL089469>

Возникновение регулярного течения у наклонной поверхности в стратифицированной турбулентной среде

Ингель Л.Х.^{1,2}

¹НПО "Тайфун", Обнинск, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
lev.ingel@gmail.com

Ключевые слова: *стратифицированная среда, турбулентность, склоновые течения, пространственно-неоднородные коэффициенты переноса*

Обращается внимание на следующий эффект: у наклонной поверхности в стратифицированной по температуре (плотности) турбулентной среде в поле силы тяжести должно возникать регулярное течение вдоль склона (даже при отсутствии источников/стоков плавучести и количества движения). Это связано с существованием вблизи твердой поверхности области ослабленного турбулентного обмена, иными словами, с возникновением пространственных неоднородностей эффективного коэффициента турбулентного переноса тепла (плавучести). У наклонной поверхности при этом возникают горизонтальные составляющие градиентов температуры, плотности и, следовательно, гидростатического давления. Это, в свою очередь, приводит к возникновению среднего (нетурбулентного) склонового течения.

Этот эффект, видимо, остался практически незамеченным в геофизической литературе по теории склоновых течений. В классической теории склоновых ветров для возникновения течений считается необходимым наличие у наклонной поверхности источников/стоков тепла или количества движения, а для рассматриваемого эффекта этого не требуется. Анализируются причины качественного расхождения теории склоновых течений с приведенными выше простыми физическими соображениями. Сделан вывод о наличии в литературе систематической ошибки, связанной с неточной записью уравнения переноса тепла. Приводится уточненная система уравнений, позволяющая описать эффект возникновения склоновых течений, обусловленный пространственными неоднородностями коэффициентов переноса. Приводится пример численного решения.

Автоматизированный аппаратный комплекс для исследования микроструктуры пылевого аэрозоля на опустыненных территориях

Карпов А.В.¹, Горчаков Г.И.¹, Бунтов Д.В.¹, Даценко О.И.^{1,2}, Жуланов Ю.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

karpov@ifaran.ru

Ключевые слова: опустынивание, эмиссия пылевого аэрозоля, автоматизированный аппаратный комплекс, концентрация частиц аэрозоля, распределение частиц по размерам, градиент концентраций аэрозоля, временная изменчивость концентрации аэрозоля, влияние конвективных структур

Пылевой аэрозоль прямо и косвенно влияет на радиационный режим атмосферы и климат. Большое количество пылевого аэрозоля выносится с опустыненных территорий [1,2]. Процесс выноса пылевого аэрозоля в атмосферу недостаточно изучен.

Создан автоматизированный комплекс с использованием современной элементной базы для измерения микроструктуры пылевого аэрозоля в диапазоне изменения размеров частиц от 0.5 до 5 мкм на двух уровнях в приземном слое атмосферы. Подготовлено программное обеспечение системы регистрации и обработки данных измерений, проведено испытание автоматизированного комплекса.

По данным выполненных ранее на опустыненной территории измерений на уровнях 20 см и 2 м проанализированы вариации микроструктуры пылевого аэрозоля в диапазоне размеров от 0.5 до 5 мкм, получены предварительные оценки влияния на концентрации и вертикальные градиенты концентрации частиц пылевого аэрозоля конвективных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-17-00214).

Литература:

1. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 1. С. 85-97.
2. Карпов А.В. Флуктуации микроструктуры грубодисперсного и субмикронного аэрозоля на опустыненной территории // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т.21. №10. С. 844-849.

Исследование процесса вертикального переноса алевроитовых частиц

Карпов А.В.¹, Горчаков Г.И.¹, Курбатов Г.А.^{1,2}, Гушин Р.А.^{1,3}, Дашенко О.И.^{1,3}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова Физический факультет, Москва, Россия

³МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

karpov@ifaran.ru

Ключевые слова: опустынивание, ветропесчаный поток, сальтация, алевроитовая фракция, турбулентность, конвекция

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование процесса переноса алевроитовых частиц в приземном слое атмосферы. В [1] с использованием модели динамики сальтации выполнено исследование влияния на процесс сальтации алевроитовых частиц [2] динамических параметров, включая размер частицы, скорость и направление вылета с подстилающей поверхности, а также динамической скорости, характеризующей вертикальный профиль скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы. Получена зависимость от размера скорости гравитационного осаждения алевроитовых частиц.

Вертикальный перенос алевроитовых частиц в приземном слое атмосферы определяется спектром турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра. По данным измерений турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра с частотой 50 Гц определены параметры турбулентности, включая динамическую скорость в приземном слое атмосферы. Получена эмпирическая функция распределения вертикальной компоненты скорости ветра в приземном слое атмосферы. Оценены масштабы конвективных структур, обеспечивающих вертикальный перенос алевроитовых частиц, и вероятности вертикального переноса алевроитовых частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19- 05 – 00758).

Литература:

1. A. V. Karpov, G. I. Gorchakov, R. A. Gushchin, and O. I. Datsenko Aleurite particle saltation modeling//Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 2019, 112084Y
2. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гушин Р.А., Дашенко О.И. Алевроитовая фракция сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. № 2. С. 193-196.

Аппаратура и методика измерений скорости переноса электрических зарядов частицами пылевого аэрозоля

Копейкин В.М., Карпов А.В., Горчаков Г.И.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kopeikin@ifaran.ru

Ключевые слова: методика измерений, автоматизированный аппаратный комплекс, ветро-песчаный поток, электризация ветропесчаного потока, пылевой аэрозоль, электрические заряды, скорость переноса зарядов, напряженность электрического поля, поверхностная плотность зарядов

Пылевой аэрозоль на опустыненных территориях генерируется на подстилающийся поверхности под воздействием ветропесчаного потока, который отличается аномально высокой электризацией [1,2]. Большой интерес представляет электризация аэрозоля в приповерхностном слое атмосферы, поскольку она может сильно влиять на процесс выноса аэрозоля с подстилающей поверхности.

Разработана методика измерения скорости переноса электрических зарядов частицами пылевого аэрозоля на опустыненных территориях.

Созданы действующий макет датчика аэрозольных электрических зарядов и система регистрации скорости переноса частицами пылевого аэрозоля электрических зарядов.

Проведено испытание измерительной аппаратуры.

Проанализированы результаты выполненных ранее комплексных измерений напряженности электрического поля и электрического тока сальтации в приповерхностном слое атмосферы. Получена количественная оценка поверхностной плотности электрических зарядов и предварительная оценка скорости переноса электрических зарядов частицами пылевого аэрозоля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-17-00214).

Литература:

1. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Бунтов Д.В., Соколов А.В. Удельный заряд сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // ДАН. 2014. Т. 456, № 4. С. 476–480.
2. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Титов А.А., Бунтов Д.В., Кузнецов Г.А., Гушин Р.А., Даденко О.И., Курбатов Г.А., Серегин А.О., Соколов А.В. Вариации удельного заряда сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 1. С. 31 – 39.

Зоны турбулентности в свободной атмосфере и их характеристики по данным спутниковых измерений

Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивановродский Р.В.

НПО "Тайфун", Обнинск, Россия

nerushev@rpatvphoon.ru

Ключевые слова: турбулентность в ясном небе, геостационарные метеорологические спутники, характеристики зон турбулентности, высотные струйные течения

Турбулентность в ясном небе (ТЯН), встречающаяся в верхней тропосфере, помимо существенного влияния на летательные аппараты играет также важную роль в динамике атмосферы. За счет влияния на тропосферно-стратосферный обмен, ТЯН может приводить к перераспределению радиационно-активных компонент таких, как озон и водяной пар, что в свою очередь может изменить температурную структуру области тропопаузы и динамику тропосферы. Основным источником информации о ТЯН являются сообщения пилотов, а также измерения с помощью оборудования, установленного на воздушных судах. Для прогноза ТЯН в настоящее время чаще всего используется расчеты определенных предикторов (индексов ТЯН) по выходным данным прогностических моделей. В то же время использование информации с геостационарных метеорологических спутников, поступающей с высоким временным разрешением (~15 мин), позволяет на основе разработанного нами метода в режиме квазиреального времени выявлять зоны турбулентности в верхней тропосфере, а также исследовать особенности их пространственно-временной изменчивости. Рассмотрена динамика областей турбулентности разной интенсивности северного полушария в зоне обзора европейских геостационарных метеорологических спутников на временном интервале 2007-2019 гг. Исходя из реального диапазона изменения коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии (K_{ed}) в верхней тропосфере, определенного на основе обработки данных спутниковых измерений, вводятся градации турбулентности по диапазонам изменения K_{ed} . Выявлено существенно различное поведение зон турбулентности разной интенсивности на рассмотренном временном интервале. Установлена и обсуждается их связь с характеристиками высотных струйных течений. Предложена статистическая модель временной изменчивости зон турбулентности разной интенсивности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-00831а.

Процессы формирования турбулентности в некоторых астрономических обсерваториях

Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

nev@iao.ru

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, когерентная турбулентность, астрономическая обсерватория

Систематизированы результаты многолетних исследований процессов формирования атмосферной турбулентности над территориями и в закрытых специализированных помещениях некоторых астрономических обсерваторий: Саянской солнечной СО РАН, Байкальской астрофизической СО РАН, Специальной астрофизической РАН, Обсерватории Колыванского хребта, Института оптики атмосферы СО РАН в г. Томске [1, 2].

В натурных измерениях характеристик турбулентности использовались акустические (в измерениях флуктуаций метеопараметров с помощью ультразвуковой метеосистемы) и оптические (в измерениях характеристик дрожания изображения в телескопе) методы. Установлена закономерность изменений локальной структуры (типа) турбулентности (колмогоровская или когерентная) в зависимости от рельефа местности и направления скорости ветра. Определены условия формирования долгоживущих областей когерентной турбулентности в атмосфере над территориями обсерваторий. Определены основные причины формирования подкупольной турбулентности, устранение которых может быть использовано для минимизации влияния турбулентности в закрытых помещениях телескопов.

Подтверждено, что над территориями обсерваторий и внутри закрытых помещений в условиях когерентной турбулентности одномерные частотные спектры флуктуаций температуры в инерционном интервале отличаются от спектров колмогоровской турбулентности. Подтвержден эффект ослабления флуктуаций оптического излучения в условиях когерентной турбулентности. Разработан подход к анализу влияния температурных режимов и форм конструкций подкупольных помещений на качество изображений в телескопах, основанный на численном решении краевых задач для уравнений Навье–Стокса с граничными условиями, заданными из результатов натурных измерений. Это позволяет восстановить распределение параметров турбулентности и тестировать характеристики телескопов.

Исследования поддержаны проектом П.10.3.5 (AAAA-A17-117021310146-3) и проектом № 20-17-00187 РФФ.

Литература:

1. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Формирование турбулентности в астрономических обсерваториях юга Сибири и Северного Кавказа // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 3. С. 1-19.
2. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В., Афанасьев В.Л., Балега Ю.Ю., Власюк В.В., Панчук В.Е., Якопов Г.В. Исследования астроклимата в Специальной астрофизической обсерватории РАН // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 8. С. 616–627.

Измерения турбулентных характеристик в теории подобия Монина–Обухова

Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
nev@iao.ru

Ключевые слова: турбулентность, теория подобия, пространственные производные

Как известно [1], традиционная теория подобия Монина-Обухова применима в приземном слое турбулентной атмосферы над плоской подстилающей поверхностью (изотропный пограничный слой [2]). Турбулентные масштабы температуры и скорости считаются постоянными, а числа Монина-Обухова ζ (отношение высоты z к масштабу Монина-Обухова L , $\zeta = z / L$) по абсолютной величине обычно не превосходят нескольких единиц (в измерениях). В работе [2] показано, что в горном приземном слое (анизотропный пограничный слой [2]) теория подобия Монина-Обухова выполняется локально (в некоторой окрестности каждой точки слоя). При этом турбулентные масштабы температуры и скорости становятся функциями от ζ и существенно расширяется диапазон изменения зарегистрированных чисел ζ ($-102819 \leq \zeta \leq +197$ [3]).

В настоящей работе представлены новые результаты измерений вертикальных производных средней температуры, средней скорости горизонтального ветра и измерений характеристик универсальной функции подобия $\phi(\zeta)$. Измерения были произведены летом 2019 г. в горном пограничном слое турбулентной атмосферы Саянской солнечной обсерватории. В измерениях использован новый мобильный аппаратно-программный ультразвуковой комплекс АМК-03-4, разработанный для регистрации статистических характеристик турбулентной атмосферы и их пространственных производных.

Показано, что при больших по модулю отрицательных числах Монина-Обухова (неустойчивая стратификация) вертикальная производная средней температуры близка к отрицательной постоянной величине, а при больших положительных числах (устойчивая стратификация) – к положительной постоянной. Особенный интерес представляют данные в области положительных чисел Монина-Обухова ζ , для которой поведение производных ранее не было исследовано (и отсутствуют данные в мировой научной литературе). Установлено, что вертикальная производная средней скорости горизонтального ветра представляется степенными зависимостями от $|\zeta|$ (с показателем $-2/3$ для неустойчивой стратификации и $+2/3$ – для устойчивой). Наши измерения подтверждают вид универсальной функции подобия $\phi(\zeta)$, сформулированный для нее в традиционной теории подобия Монина–Обухова [1]. Зарегистрированные нами отличия коэффициентов при одинаковых степенных зависимостях (соответствующих устойчивой и неустойчивой стратификациям) находятся в рамках погрешностей измерений.

Исследования поддержаны проектом П.10.3.5 (AAAA-A17-117021310146-3) и проектом № 20-17-00187 РНФ.

Литература:

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т.1. М.: Наука, 1965. 639С.; Т.2. М.: Наука, 1967, 720С.
2. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т.18. №10. С.845–862.
3. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Турбулентные масштабы теории подобия Монина-Обухова в горном анизотропном пограничном слое // Изв. вузов. Физика. 2020. Т.63. №2 (746). С.55–60.

Долговременные колебания температуры в приземном слое атмосферы в городах Цимлянск и Томск

Носов В.В.¹, Лукин В.П.¹, Носов Е.В.¹, Торгаев А.В.¹, Богушевич А.Я.²

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

nev@iao.ru

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, спектр флуктуаций температуры воздуха, Цимлянск, Томск

Построены вековые временные частотные спектры флуктуаций температуры воздуха для расширенного временного диапазона: от мезометеорологического до внутривекового интервала для г. Цимлянска за 67 полных лет наблюдений лет (1952–2018 гг) и от микрометеорологического до внутривекового интервала для г. Томска за 138 полных лет наблюдений (1881–2018 гг). Спектры составлены из смежных интервалов, в качестве источников данных для которых использованы: I) базы данных [1] ежедневных измерений температуры воздуха и количества осадков, II) базы данных [2] восьмисрочных наблюдений за основными метеорологическими параметрами, III) собственные данные измерений флуктуаций температуры воздуха с применением ультразвуковой метеосистемы АМК-03. Спектр для г. Цимлянска составлен из интервалов I и II, для г. Томска – I, II и III. Диапазон временных частот спектра для г. Цимлянска: $4,7 \cdot 10^{-10}$ Гц — $4,6 \cdot 10^{-5}$ Гц, для г. Томска: $2,3 \cdot 10^{-10}$ Гц — $8 \cdot 10^{-1}$ Гц. Спектр представлен в виде графика функции $f \cdot W_T(f)$, где f – временная частота, $W_T(f)$ – спектр мощности флуктуаций температуры.

Выбор г. Цимлянск обусловлен расположением вблизи него экспериментальной базы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, где на протяжении длительного периода производятся измерения характеристик атмосферной турбулентности, что позволяет сопоставить известные для г. Цимлянска результаты других авторов с полученными в данной работе. В то время как имеющиеся для г. Томска данные измерений флуктуаций температуры воздуха с применением метеосистемы АМК-03 позволяют расширить исследования на высокочастотную область. Полученные результаты подтверждают известный из литературы вид спектра флуктуаций температуры.

Исследования поддержаны проектом П.10.3.5 (AAAA-A17–117021310146-3) и проектом № 20-17-00187 РФФ.

Литература:

1. Булыгина О.Н, Разуваев ВН, Александрова ТМ "Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR)" №2014620942. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>
2. Булыгина О.Н, Веселов ВМ, Разуваев ВН, Александрова ТМ "Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России". №2014620549. <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>

Измерение турбулентной диффузии под взволнованной поверхностью

Погарский Ф.А.¹, Полников В.Г.¹, Ма Х.², Чанг Ш.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²First Institute of Oceanography of Ministry of Natural Resources, Qingdao, China
pogarskiy@ifaran.ru

Ключевые слова: волны, турбулентность, диффузия, измерения в лотке

Путем измерения скорости расплывания чернильного пятна в слое воды под волнами выполнены оценки коэффициента турбулентной диффузии D с применением формулы Эйнштейна. Сравнение полученных оценок с набором модельных параметризаций D , как функции параметров системы, показало, что в присутствие ветровых волн, статистическое преимущество имеет параметризация вида $D \sim u^* a_0 \Delta$, а при наличии механических волн – параметризация $D \sim a_0^3 f_p / z$, где: u^* - динамическая скорость, a_0 - амплитуда волн на поверхности, f_p - частота пика спектра волн, Δ - крутизна волн, а z – глубина измерений. Обсуждаются вопросы выполнения измерений и методики сравнения теории с экспериментом.

Характеристики турбулентности, индуцированной механическими волнами в лотке

Полников В.Г.¹, Цяо Ф.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Первый институт океанографии Министерства Природных Ресурсов, Цындао, Китай
polnikov@mail.ru

Ключевые слова: волны, течения, турбулентность, стандартные отклонения, скорость диссипации турбулентности, параметризация

По данным лотковых измерений трех компонент скорости u_i ($i = x, y, z$), выполненных на трех горизонтах в воде, изучались стандартные отклонения σ_i и частотные спектры $S_i(f)$ рядов течений, обусловленных присутствием механических волн. Механические волны, как регулярные, так и стохастические, генерировались волнопродуктором для трех вариантов доминантных частот f_0 и набора из трех-пяти значительных высот волн H_s для каждой частоты. Установлено отсутствие изотропии распределения стандартных отклонений σ_i для измеренных рядов компонент скорости, и стандартных отклонений $\sigma_i F$ для рядов, в которых отфильтрованы волновые движения. Высокочастотные участки спектров отфильтрованных рядов для горизонтальных компонент скорости u_x и u_y идентичны, и, как правило, имеют степенной закон спада по частоте « -1.6 ± 0.1 ». В том же диапазоне частот, спектры вертикальных компонент имеют закон спада « -2.0 ± 0.1 ». Эти участки трактуются как аналоги колмогоровских спектров, обусловленных передачей энергии от орбитальных движений механических волн вверх по частотам. Предполагается, что указанная разница законов спада спектров для горизонтальных и вертикальных компонент обусловлена различной механикой турбулентности в различных плоскостях. Построена модельная модификация колмогоровского спектра с законом спада « -2 », как аналогия лагранжевой турбулентности[1], и по интенсивности высокочастотных спектров $S_z(f)$ определены величины скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ϵ . Приводятся и обсуждаются полуэмпирические параметризации зависимостей σF и ϵ от параметров волн и глубины горизонта измерения.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 18-05-00161.

Литература:

1. Г. С. Голицын, Статистика и динамика природных процессов и явлений. Москва: КРАСАНД, 2012. - 400 с..

Влияние силы Кориолиса на АКА эффект

Руткевич П.Б.¹, Голицын Г.С.², Руткевич П.П.³, Тур А.В.⁴

¹*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

²*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

³*Institute Of Chemical And Engineering Sciences Limited, A*STAR, Singapore*

⁴*Institut de Recherche en Astrophysique et Planetologie (IRAP), Toulouse, France*

pbrutkevich@gmail.com

Ключевые слова: АКА эффект, сила Кориолиса, турбулентность, крупномасштабная неустойчивость, чётность, малый параметр.

В работе рассматривается крупномасштабная неустойчивость в несжимаемой жидкости, так называемый, АКА – эффект (Анизотропный Кинетический Альфа эффект). Крупномасштабная неустойчивость появляется под действием мелкомасштабной неспиральной внешней силы, в которой не сохраняется чётность. Внешняя сила не является случайной, что позволяет применить необычный для теории турбулентности математический аппарат. Используемый метод нелинейных расчётов позволяет выделить порядки разложения по малому параметру и получить крупномасштабные уравнения из соответствующих секулярных соотношений, которые появляются во многих порядках разложения.

О каскаде механической энергии в Океане

Сибгатуллин И.Н.^{2,1}, Рязанов Д.А.², Провидухина М.А.¹, Ерманюк Е.В.², Доксуа Т.³

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Институт системного программирования им. В.П.Иванникова РАН, Москва, Россия

³Институт гидродинамики СО РАН им. М.А. Лаврентьева

⁴Высшая нормальная школа Лиона (ENS de Lyon), Лион, Франция

sibgat@ocean.ru

Ключевые слова: турбулентность, обратный каскад, прямой каскад, внутренние волны, инерционные волны

В сравнении в атмосферой, мировому Океану труднее сопоставить классическую тепловую машину: для меридионального потока тепла и глубоководной циркуляции необходимо механическое воздействие. В свою очередь, замыкание меридиональной циркуляции зависит от каскада механической энергии в толще океана и его влияния на вертикальное перемешивание. В связи в этим изучение каскада механической энергии от крупномасштабных приливных воздействий к мелкомасштабным внутренним волновым движениям и перемешиванию приобретает особую важность. В наших работах предлагаются простые модели для изучения основных механизмов каскадов неустойчивостей, как прямых, так и обратных, в стратифицированных или вращающихся объемах жидкостей. При этом учитываются особые свойства распространения пучков внутренних и инерционных волн: при отражении от наклонных поверхностей сохраняется угол пучка к вертикали, а не к нормали к поверхности. В результате, после отражения может возникнуть фокусировка или расфокусировка пучков волн. Лео Маасом было показано, что в замкнутых геометриях при постоянной монохроматической накачке фокусировка превалирует над расфокусировкой и в общем случае возникают замкнутые траектории к которым сходятся пучки волн - волновые аттракторы. Также были проведены оценки, что для характерной орोगрафии океанского дна в плоской задаче на каждую тысячу километров приходится около десяти аттракторов. С прикладной точки зрения наиболее интересны турбулентные режимы, наблюдаемые в Океане. Мы впервые экспериментально и численно показали, что при умеренных амплитудах воздействия в модельных задачах о динамике стратифицированной жидкости в бассейне с наклонным дном переход к турбулентным режимам происходит через каскад триадных взаимодействий [1,2]. При больших амплитудах на фоне накачки энергии в аттрактор наблюдаются явления опрокидывания внутренних волн, приводящие к интенсивному вертикальному перемешиванию. С другой стороны, во вращающихся слоях жидкости с увеличением амплитуды внешнего воздействия на фоне мелкомасштабной турбулентности наблюдается обратный каскад, приводящий к азимутальной циркуляции крупных вихревых структур, для которой проводится сопоставление с волнами Россби.

Литература:

1. Сибгатуллин И. Н., Ерманюк Е. В. Аттракторы внутренних и инерционных волн // Прикладная механика и техническая физика. — 2019. — № 2.
2. Ilias Sibgatullin, Evgeny Ermanyuk, Leo Maas, Xu Xiulin, and Thierry Dauxois. Direct numerical simulation of three-dimensional inertial wave attractors // IEEE Conference Proceedings. 2017.
3. C. Brouzet, E. V. Ermanyuk, S. Joubaud, I. Sibgatullin, and T. Dauxois. Energy cascade in internal-wave attractors // Europhysics Letters. 2016.V. 113, no. 4.

Турбулентная структура атмосферного пограничного слоя при наличии слоисто-кучевой облачности над морским льдом в Арктике

Чечин Д.Г.^{1,2}, Люпкес К.³, Хартманн Й³

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Гельмгольц-центр Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Бремерхафен, Германия
chechin@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, турбулентность, слоисто-кучевая облачность, Арктика, морской лед

Исследование турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя проведено на основе самолетных наблюдений, полученных во время измерительной кампании ACLLOUD (Arctic CLoud Observations Using airborne measurements during polar Day) в июне 2017 года над морским льдом к северу от Шпицбергена. Измерения осуществлялись самолетами-лабораториями Polar 5 и Polar 6 Института им. Альфреда Вегенера (Бремерхафен, Германия). Для расчета турбулентных статистик и их вертикальных профилей внутри пограничного слоя использовались регистрируемые с частотой 100 Гц измерения трех компонент скорости ветра и температуры воздуха. Три компонента скорости ветра рассчитывались по измерениям 5-канального приемника воздушных давлений, установленного на выносе на носу самолета. Там же был установлен малоинерционный датчик температуры воздуха — термометр сопротивления, использующий открытую платиновую нить. Для анализа выбрано несколько контрастных случаев, отличающихся скоростью ветра, величиной длинноволнового радиационного выхолаживания на верхней границе облачности и высотой пограничного слоя. Показано, что при слабом и умеренном ветре длинноволновое выхолаживание на верхней границе облачности (и соответствующий положительный поток плавучести) является основным механизмом генерации турбулентности в пограничном слое. В этих случаях сильные нисходящие движения («перевернутая» конвекция) наблюдались в облачном слое и ниже его, что выражалось в отрицательных значениях коэффициента асимметрии вертикальной скорости. Турбулентный поток тепла, турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) и дисперсия вертикальной скорости имели ярко выраженный максимум внутри облачного слоя. При слабом ветре наблюдались различия между турбулентной структурой нижней части пограничного слоя и облачным слоем, что могло свидетельствовать о так называемом «декаплинге», т. е. слабой связи между этими частями пограничного слоя. Другая турбулентная структура пограничного слоя наблюдалась в случае, когда длинноволновое выхолаживание на верхней границе облачности нижнего яруса было слабым вследствие наличия облачности среднего яруса. В этом случае, ТКЭ достигала меньших значений, а генерация турбулентности происходила за счет сдвига ветра и положительного потока плавучести на поверхности льда. В случае с сильным ветром сдвиговая генерация турбулентности была сопоставима по величине с генерацией за счет длинноволнового выхолаживания на верхней границе облачности. Максимум ТКЭ в этом случае был расположен не в облачном слое, а вблизи поверхности морского льда. Во всех рассмотренных случаях на верхней границе пограничного слоя наблюдался сильный скачок средней температуры воздуха до 5–7 К, а также существенный сдвиг ветра. В этих условиях турбулентное вовлечение на верхней границе пограничного слоя привело бы к заметным потокам тепла и влаги, однако получить надежных оценок этих потоков не удалось вследствие недостаточного количества наблюдений.

Работа выполнена за счет гранта РНФ № 18-77-10072.

Генерация турбулентности поверхностными волнами: сопоставление модельных и натурных данных

Чухарев А.М.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

alexchukh@mail.ru

Ключевые слова: *поверхностные волны, турбулентность, натурные измерения, скорость диссипации*

Волновые движения на поверхности моря являются одним из механизмов генерации турбулентности и вносят определенный вклад в формирование верхнего однородного слоя. Кроме увеличения турбулентной кинетической энергии важным аспектом является взаимодействие волн и турбулентности, а именно перенос волновой кинетической энергии турбулентными движениями. Основную роль при этом, по-видимому, играют движения, сравнимые по масштабам с толщиной волнового слоя. Для оценки вклада волнения в вертикальный турбулентный обмен используются различные подходы, в которых определяющими параметрами являются характеристики волнения: энергия, амплитуда, частота и др. В настоящей работе проводится сопоставление предлагаемых модельных формул с экспериментально определенными характеристиками интенсивности турбулентности в слое активного волнового воздействия.

Экспериментальные данные собраны в натурных условиях на океанографической платформе в п. Кацивели (Крым) с помощью специализированной аппаратуры. Скорость диссипации турбулентной энергии в исследуемом слое определялась по пульсациям скорости с привлечением гипотез Колмогорова и Тэйлора.

Сравнение с модельными расчетами показало справедливость основного предположения о том, что интенсивность турбулентности, обусловленной волнением, зависит от энергетических характеристик волнения, но при этом ее убывание с глубиной происходит быстрее, чем энергия орбитального движения.

Характерные размеры термических и вихревых структур в приземном слое атмосферы

Шишов Е.А., Соленая О.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

shishov.vegor@gmail.com

Ключевые слова: *турбулентность, приземный слой, вихревые движения, конвективные структуры*

В летние сезоны 2015, 2016, 2018 и 2019 годов на базе Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН в Ростовской области проводились измерения пульсаций направления ветра и температуры воздуха в приземном слое. Часть результатов измерений 2015 года опубликована в [1]. Для измерений использовались комплекты флюгеров и малоинерционных термометров. Датчики устанавливались в ряд вдоль или поперек направления среднего ветра на высоте 2 метра. В различных экспериментах расстояние между ближайшими датчиками составляло от 1 до 20 метров с общим охватом от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Аналогичные эксперименты описаны в работах [2].

Корреляционный анализ полученных данных позволил определить характерные размеры термических и вихревых структур при различных синоптических условиях. Для ночных условий типичный размер вихрей составляет от 2 до 15 метров. Днем поперечный (относительно среднего ветра) размер увеличивается до 20-40 метров, а продольный – до 40-60 метров. При переходе от устойчивой стратификации к развитой конвекции вихревые структуры не только увеличиваются в размерах, но и вытягиваются вдоль ветра.

Размер термических структур варьируется от 5 до 35 метров. Долгопериодные, порядка нескольких минут, колебания температуры совпадают с изменением среднего направления ветра. На меньшем масштабе корреляция между температурой и направлением ветра почти всегда отсутствует. Несмотря на это, вихревые и термические структуры могут быть связаны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант 18-35-00591.

Литература:

1. Е.А. Шишов, О.А. Соленая, Б.М. Копров, В.М. Копров. Исследование вариаций направления ветра вблизи поверхности земли // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. No 6. С. 611–620.
2. С.И. Кречмер. К вопросу об изменчивости направления ветра. Труды ГЕОФИАН, № 33 (160), 1956.
3. E. Doorn, B. Dhruva, K. R. Sreenivasan, V. Cassella. Statistics of wind direction and its increments. Physics of Fluids. 2000. V. 12, №6, pp.1529-1534.

Флуктуации давления в турбулентной атмосфере

Юшков В.П.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

yushkov@phys.msu.ru

Ключевые слова: турбулентность, давление, энтропия, адиабатический шум

Детально проанализировано место адиабатических флуктуаций давления в турбулентном перемешивании. С их помощью объясняется выравнивание пространственных неоднородностей скорости звука и энтропии между турбулентными вихрями, а также перенос энергии между кинетической и потенциально доступной формой. Они характеризуют неопределённость, возникающую между оценкой адвекции флуктуаций давления в турбулентных вихрях и работой сил адиабатических флуктуаций давления. На основе предположения, что потенциально доступная энергия равно распределена между адиабатической (σ_p^a) и турбулентной (σ_p^t) компонентами, показано, что взаимодействие между несжимаемыми и адиабатическими флуктуациями характеризует скорость перехода кинетической энергии турбулентных флуктуаций в потенциально доступную форму, которая сопоставима со скоростью диссипации ε .

Диагностика наличия глубокой конвекции с использованием спутниковых данных

Баданов А.Ю.^{1,4}, Рубинштейн К.Г.^{2,3}, Юсупов Ю.И.⁴

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

³Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

⁴НПЦ «МЭП Мейкер», Москва, Россия

badanov@gismeteo.com

Ключевые слова: глубокая конвекция, спутник, яркостная температура, стратификация конвекции

Обсуждается способ диагностики глубокой влажной конвекции с помощью информации, получаемой со спутников.

Для решения задачи диагностики степени развития конвективного процесса используются не только яркостные температуры ИК-излучения на длинах волн 10,8 мкм ($T_{ик}$, К), 6,2 мкм ($T_{вп}$), получаемые с использованием спутниковых данных, но также результаты расчётов гидродинамических моделей - температура тропопазы ($T_{тп}$, К), получаемая с использованием моделей Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [1,2,3].

В рассмотренном методе используют оценки трёх параметров конвективного процесса: температуры верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разности температуры водяного пара ($T_{вп}$) и верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разности температур верхнего слоя облаков ($T_{ик}$) и температуры тропопазы ($T_{тп}$).

Область слабой активности характеризуется яркостной температурой ИК 10,8 мкм менее 233 К ($T_{ик} < 233$ К), а также положительной разницей яркостных температур водяного пара канала 6,2 мкм и канала 10,8 мкм ($T_{вп} - T_{ик} > 0$). Область сильной активности характеризуется наличием двух предыдущих параметров, а также отрицательными значениями $T_{ик} - T_{тп}$ ($T_{ик} - T_{тп} < -2$ К).

При совместном использовании базы данных измерений метеорологических радаров, архива погодных наблюдений и результатов работы представленного алгоритма, показывается соответствие радарных данных, расчётов с использованием рассмотренного алгоритма и мест фиксации метеорологических явлений.

По результатам предварительного анализа, вероятность ложных тревог составляет от 4% до 8%, вероятность корректно определённого события — 85%-87% в зависимости от используемого параметра. Вероятность пропуска события составляет 13%, что обусловлено малостью линейных размеров явления по сравнению с разрешением спутника.

Литература:

1. Carlos Pinto Da Silva Neto et al., A method for convective storm detection using satellite data, *Atmósfera* 29(4), 343-358 (2016)
2. Michael F. Donovan et al., The identification and verification of hazardous convective cells over oceans using visible and infrared satellite observations, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47(1):164-184 January 2008
3. R. Amorati, et. al., IR-based satellite and radar rainfall estimates of convective storms over northern Italy, *Meteorol. Appl.* 7,1-18, (2000)

Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков и ее использование

Баутин С.П.¹, Крутова И.Ю.¹, Обухов А.Г.²

¹Снежинский физико-технический институт, Снежинск, Россия

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

sbautin@usurt.ru

Ключевые слова: восходящий закрученный поток, торнадо, тропический циклон, система уравнений газовой динамики, полная система уравнений Навье-Стокса

Данная газодинамическая теория [1-3] основана на предложенной С. П. Баутиным схеме возникновения и устойчивого функционирования восходящих закрученных потоков, встречающихся в природе в виде торнадо, тропических циклонов и огненных вихрей. В докладе приведены результаты полученных теоретических и экспериментальных исследований. Впервые даны научно обоснованные ответы на самые главные вопросы, связанные с природными восходящими закрученными потоками: "Что является причиной возникновения закрутки в этих потоках? Откуда берется гигантская кинетическая энергия вращающегося в них воздуха?".

В аналитическом виде и численно (включая трехмерные нестационарные расчеты) построены решения системы уравнений газовой динамики и полной системы уравнений Навье-Стокса при учете действия сил тяжести и Кориолиса, моделирующие течения воздуха в восходящих закрученных потоках. Все эти решения согласуются с данными натурных наблюдений за указанными природными воздушными течениями, а также с результатами соответствующих физических экспериментов. Доказаны математические теоремы о возникновении закрутки газа и направлении этой закрутки в исследуемых потоках и ее отсутствие при не учете вращения Земли вокруг своей оси. С использованием построенных решений установлено, что часть кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси переходит в кинетическую энергию окружного движения воздуха в исследуемых течениях. И нет другого источника энергии для создания и поддержания окружного движения в этих природных потоках. Высказаны рекомендации по практическому использованию полученных результатов: 1) по раннему обнаружению торнадо и по уничтожению торнадо и тропических циклонов с разумными энергетическими затратами; 2) по созданию вихревого энергогенератора, вырабатывающего электрическую энергию за счет кинетической энергии вращения Земли вокруг своей оси; 3) по принудительному проветриванию открытых горных выработок и мегаполисов; 4) по искусственному вызыванию дождя над заданной территорией.

Литература:

1. Баутин С.П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г., Баутин К.В. Разрушительные атмосферные вихри: теоремы, расчеты, эксперименты. Новосибирск: Наука; Екатеринбург: УрГУПС, 2013.
3. Баутин С.П., Дерябин С.Л., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Разрушительные атмосферные вихри и вращение Земли вокруг своей оси. Екатеринбург: УрГУПС, 2017.

Исследования структуры сдвигов ветра и характеристик турбулентности в облачной системе теплого фронта с помощью самолёта-лаборатории

Волков В.В.¹, Струнин М.А.², Струнин А.М.¹, Кирин Д.В.¹, Колокутин Г.Э.¹

¹*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия*

²*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

volkov-vv@mail.ru

Ключевые слова: сдвиг ветра, турбулентность, струйные течения, самолетные исследования

Измерительная система самолёта-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» обеспечивала высокоточные измерения температуры воздуха и компонентов скорости ветра. Методы расчёта сдвигов ветра и характеристик турбулентности позволяли изучать тонкую структуру полей ветра, причём погрешность определения горизонтальных сдвигов ветра составляла $0,006 \text{ мс}^{-1}/\text{км}$, вертикальных сдвигов ветра - $0,07 \text{ мс}^{-1}/100 \text{ м}$. Самолётные исследования облачности теплого фронта (системы Cs-As-Ns) показали, что пограничный слой развивался по устойчивой схеме, а на высоте 9000 м наблюдалась ось струйного течения с силой ветра до 80 мс^{-1} . В подоблачном слое (ниже 3 км) вертикальные сдвиги горизонтального ветра были невелики, $0,10 - 0,30 \text{ мс}^{-1}/100 \text{ м}$. Внутри облаков на высотах 3 – 8 км сдвиги ветра резко возрастали до значений в $1,5 \text{ мс}^{-1}/100 \text{ м}$, а в зоне струйного течения, достигали $3,0 \text{ мс}^{-1}/100 \text{ м}$. Наиболее значительные горизонтальные сдвиги ветра $0,30 \text{ мс}^{-1}/\text{км}$ наблюдались в облаках Ns (на высотах от 1 до 4 км). Выше, в облаках среднего яруса As горизонтальные сдвиги ветра составляли около $0,10 \text{ мс}^{-1}/\text{км}$. Вертикальные профили энергии пульсаций горизонтальных компонентов скорости ветра показали, что в слое облаков Ns дисперсии пульсаций достигали величин $1,8 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$, а максимум энергии пульсаций вертикального компонента отмечался на высоте 3 км и составлял $0,5 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$. Спектры пульсаций продольного и поперечных компонентов скорости ветра в нижней части облачной системы (на высоте около 3 км) соответствовали устойчивому состоянию атмосферы и имели наклон кривых с показателем степени -2. В облаках верхнего и среднего яруса (на высотах 5 и 8 км) наклон спектров соответствовал закону Колмогорова-Обухова «-5/3», а спектры поперечных компонентов имели максимумы на масштабах около 900 м. На спектрах когерентности между пульсациями температуры и вертикального компонента скорости ветра максимумы (с амплитудами около 0,8) наблюдались на масштабах 900 - 1200 м. Когерентность пульсаций в нижней части облачной системы не превышала 0,3. Спектральная структура вертикальных пульсаций скорости ветра указывала на зону неустойчивости в облачной системе на высотах 5 – 8 км, что подтверждалось и результатами радиозондирования. Зона неустойчивости в облаках приводила к формированию осадков в виде дождя с интенсивностью до 3-5 мм/ч.

Многорежимность в тонких вращающихся слоях жидкости

Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия
leg@ifaran.ru

Ключевые слова: квазидвумерные течения, многорежимность, атмосферная циркуляция

Идея о множественности равновесных состояний атмосферной циркуляции в геофизической гидродинамике восходит к работе Charney, DeVore 1979, где для модели с малым числом переменных были получены решения с существенно отличающимися величинами зональной и волновой компонентами скорости. Результаты аналогичных исследований для малопараметрических аппроксимаций были приведены у Kallen, Gluhovsky, Koo и др.. Режимы циркуляций отличались величиной зональной составляющей потока. При слабом переносе роль почти стационарных атмосферных вихрей усиливается, что соответствует режимам блокирования циркуляции. Лабораторное подтверждение эффекта приведено у Weeks et al., Tian et al.

В те же годы в экспериментах А.М. Обухова с сотрудниками в замкнутых сосудах наблюдались режимы с разнонаправленными осями крупномасштабного вращения жидкости при одной и той же величине внешней генерации гидродинамических течений.

В настоящем исследовании, поддержанном РНФ 19-17-00248, указанные виды многорежимности рассмотрены на основе лабораторных и численных экспериментов в кольцевых вращающихся каналах. Известно, что конфигурации расположения постоянных магнитов/источников-стоков могла создавать почти стационарную картину распределения вихрей Гледзер и др. 2013, 2014. При этом, как и в экспериментах А.М. Обухова, переход между различными состояниями обеспечивается изменением величины основного параметра генерации течений с последующим восстановлением его исходного значения. В зависимости от периода вращения канала или конфигураций источников возможно: 1) Начальный и конечный режимы отличаются количественно по числу образовавшихся вихрей. 2) Число вихревых образований не меняется, однако отличаются их пространственной локализацией. 3) После изменения и восстановления значения определяющего параметра течение возвращается к режиму, практически не отличающегося от исходного. Приведены картины течений и соответствующие диаграммы для лабораторных экспериментов и численных расчетов по уравнениям мелкой воды.

Анализ частотных спектров морского волнения и законов разгона с точки зрения вероятностных законов А. Н. Колмогорова и его школы

Голицын Г.С.¹, Байдаков Г.А.², Троицкая Ю.И.^{1,2}

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

gsg@ifapan.ru

Ключевые слова: ветровые волны, спектры, автомодельность

В работе рассматриваются спектральные характеристики ветрового волнения на базе результатов многочисленных натурных экспериментов, численного моделирования и теоретических представлений в рамках вероятностных законов А.Н. Колмогорова. В последнее время В. Е. Захаров [1] разделил спадающую часть спектра на два участка: «море Хассельмана» в интервале частот от пикового значения до пятой гармоники, где спадание пропорционально частоте в степени -4 , и «море Филлипса» с пропорциональностью минус пятой степени. В первом участке содержится до 95% энергии волнения, а потому его форма должна определять пропорциональность таких интегральных параметров как безразмерные высота и период волн в степени $3/2$, что с высокой точностью подтверждается ранними экспериментами Тобы [2]. Объяснение такой нестандартной зависимости дал В. Е. Захаров: если проинтегрировать правую часть спектра от пикового значения частоты до бесконечности, то слева будет квадрат высоты, а справа период в третьей степени. Однако, в дальнейшем эксперименты и численный счёт показали, что наклон спектра в некоторых пределах зависит от возраста волнения: от $-13/3$ для молодых волн до $-11/3$ для насыщенных волн и волн зыби. В этом случае наблюдается разброс степени пропорциональности высоты волны её периоду от $4/3$ для волн зыби до $5/3$ для молодых волн. Объяснения этой тенденции дают вероятностные законы Колмогорова, прослеживаемые в самых разнообразных природных явлениях.

Если рассмотреть законы разгона (см [3]), описывающие изменение высоты и периода пика волны, подставив в них результаты многочисленных натурных измерений, то зависимость $3/2$ подтверждается с высокой точностью (около 10% при общем усреднении и до 2% при группировке данных в зависимости от возраста волнения). Однако, сложность системы с развивающимися волнами, изменяющимся по силе и по направлению ветром, разнообразием погодных условий, пока не позволяет четко разграничить группы для уточнения соотношения высоты и периода волн.

Литература:

1. Zakharov Vladimir. Analytic theory of a wind-driven sea. Scientific Direct. Proceeding IUTAM Symposium Wind Waves. 4-8 September, 2017. London, UK.
2. Toba Y. Local balance in the air-sea boundary processes. I. On the growth process of wind waves. J. Oceanogr. Soc. Japan 1973. 28, 109-120.
3. Komen G. J., Cavaleri L., Donelan M. et al. Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge: CUP. 1994.

Влияние шума на выбор волнового числа в течениях с вращением

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.
Институт механики МГУ, Москва, Россия
jilenko@imec.msu.ru

Ключевые слова: геофизические течения, шум, выбор волнового числа, сферическое течение Куэтта

Исследования влияния шума на течение могут представлять интерес при изучении выбора режимов крупномасштабной атмосферной циркуляции, включая взаимодействие волн Россби и переходов между ними [1]. Один из возможных источников шума-неравномерное во времени (порядка 0.1 ms) вращение Земли [2]. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса выбора одного из двух возможных волновых чисел при потере устойчивости в сферическом течении Куэтта. Шумовые возмущения, пропорциональные скорости вращения внутренней сферы, вносились системой управления в сигнал скорости вращения. Потеря устойчивости происходила при вращении внутренней сферы с постоянным по величине ускорением. Ускоренное вращение начиналось при числах Рейнольдса, соответствующих стационарному течению, и заканчивалось при числах Рейнольдса выше предела устойчивости. Далее скорость вращения внутренней сферы поддерживалась постоянной, внешняя сфера в течении всего времени эксперимента была неподвижна. Показано, что при прочих неизменных условиях, обеспечивающих формирование моды с азимутальным волновым числом $m = 3$, увеличение амплитуды шума ведет к смене волнового числа на $m = 4$ [3]. Установлены три сценария выбора волнового числа в зависимости от амплитуды шума и величины ускорения. Показано, что введение дополнительного шума влияет на обмен энергией между конкурирующими линейными модами, увеличивая их максимальные амплитуды, инкременты нарастания и общее время взаимодействия мод

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты 18-08-00074 и 19-05-00028.

Литература:

1. Sura P., Newman N., Penland C., Sardeshmukh P. // J. Atmos. Sci. 2005. 62. Pp. 1391-1409.
2. Hide R., Dickey J.O. // Science. 1991. 253. Pp. 629-637.
3. Zhilenko D., Krivososova O., Gritsevich M., Read P // Chaos. 2018. 28. 053110

Использование теории нормальной корреляции векторов А.М. Обухова для научных исследований и инженерных расчётов дрейфа льда в Северном Ледовитом океане

Иванов Н.Е.¹, Демчев Д.М.^{1,2}, Нестеров А.В.¹

¹Арктический и антарктический научно исследовательский институт, Санкт-Петербург,
Россия

²Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию (НАНСЕН-
ЦЕНТР), Санкт-Петербург, Россия
neivanov@aari.ru

Ключевые слова: корреляция векторов, дрейф льда, ветер, морские течения, северный ледо-
витый океан, современная климатическая изменчивость

Доклад посвящён одному из первых крупных научных достижений А.М. Обухова – теории нормальной корреляции векторов (Обухов 1939, 1940). Первоначально она создана для описания системы аффинных векторов в абстрактном алгебраическом пространстве. Позднее показано, что она хорошо применима для характеристики сопряжённости плоских евклидовых векторов. Эта теория в сочетании с векторно-алгебраическим методом вероятностного анализа векторов (Белышев и др. 1983) и корреляционного метода Ватанабэ–Гудковича (Гудкович, Доронин, 2001) позволила получить ряд важных теоретических результатов, она активно используется в научных исследованиях дрейфа морского льда, поверхностной циркуляции и для инженерных расчётов. На основе сочетания уравнения и векторно-алгебраического метода получена упрощённая система двух скалярных показателей векторной корреляции в инвариантной форме (Иванов, 2004). На российском арктическом шельфе активно развивается добыча углеводородов и другие виды хозяйственной деятельности. Одной из наибольших опасностей являются айсберги и крупные ледяные поля. Созданная система управления ледовой обстановкой (УЛО) позволяет (с помощью данных ИСЗ) выявлять эти потенциально опасные объекты с заблаговременностью до нескольких недель. Исследования климатической изменчивости поверхностной циркуляции предполагает наличие полей скорости течений. На основе измерений с ИСЗ получена непрерывная последовательность полей дрейфа с 1979 г. Примеры этих полей и ряд предварительных оценок климатической изменчивости приведены в работе (Volkov et al. 2012). Совместное использование уравнения и полей ветра по данным реанализа позволяет получить для всего СЛО поля неветровой поверхностной циркуляции без использования численного моделирования.

Доклад подготовлен при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60048.

Литература:

1. Обухов А.М. Нормальная корреляция векторов. // Известия АН СССР. Отделение математических и естественных наук. 1938. № 3. с. 339–370.
2. Обухов А.М. Теория корреляции векторов. // Ученые записки МГУ, серия математическая. 1940. Вып. 45. С. 73–92.
3. Белышев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 264 с.
4. Гудкович З.М., Доронин Ю.П. Дрейф морских льдов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 110 с.
5. Иванов Н.Е. Метеорология и гидрология. 2004. № 8, С. 65–78.
6. Volkov V.A., Ivanov N.E and Demchev D.M. Journal of Operational Oceanography. 2012. Vol. 5. No 2. P. 61–71.

К нелинейной динамике турбулентных термик

Ингель Л.Х.^{1,2}

¹НПО "Тайфун", Обнинск, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

lev.ingel@gmail.com

Ключевые слова: конвекция в атмосфере, термики, турбулентность, интегральные модели, сдвиговые течения, стратификация, нелинейная динамика, аналитическая модель

Нередко используемая модель турбулентной конвекции от локализованных источников плавучести и (или) вертикального импульса, действующих в течение короткого времени – изолированные термики. В такой модели область возмущения (термик) приближенно представляется в виде поднимающегося (или опускающегося – в зависимости от знака возмущения) «пузыря» или вихревого кольца переменного объема и массы. Доклад посвящен обобщению такой модели в следующих направлениях:

1. В традиционных теоретических моделях конвекции от локализованных источников результаты обычно слабо зависят от размеров источников – конвективные струи и изолированные термики быстро “забывают” геометрию источников. Но в последнее время стали актуальными некоторые новые задачи, в которых размеры источников относительно велики и могут существенно влиять на результаты. Сюда относятся, например, задачи о динамике мощных выбросов метана геологического происхождения. Сообщается, что для некоторых таких источников характерны большие объемы выбросов в течение короткого времени. При этом актуален, в частности, вопрос, могут ли такие термики достигать уровня тропопаузы, поскольку проникновение метана в стратосферу может заметно влиять, например, на содержание озона. В докладе теоретически исследуются особенности турбулентной конвекции от источников относительно больших горизонтальных масштабов.

2. Задача существенно усложняется и относительно мало исследована в случаях, когда термик может двигаться под углом к вертикали. Такие ситуации естественным образом возникают, например, при подъеме или снижении термика в горизонтальном потоке с вертикальным сдвигом. В докладе рассмотрено обобщение задачи на случай трехмерного движения термика на фоне сдвигового потока. Дополнительно допускается возможность наличия в термике источников плавучести и количества движения, а также возможность неустойчивой фоновой стратификации,

Выражено в квадратурах общее аналитическое решение, которое описывает различные режимы динамики термиков. Обращается внимание на нелинейный эффект взаимодействия разных составляющих движения термика, поскольку каждая из них влияет на интенсивность вовлечения окружающей среды, т.е. на скорость роста объема термика и, следовательно, на его подвижность. Интенсификация вовлечения за счет взаимодействия термика с поперечным потоком может приводить к более быстрому расширению термика и уменьшению его подвижности.

К теории мезомасштабных циркуляций над термически неоднородной подстилающей поверхностью

Ингель Л.Х.^{1,2}, Макоско А.А.²
¹НПО "Тайфун", Обнинск, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
lev.ingel@gmail.com

Ключевые слова: термические неоднородности подстилающей поверхности, местные ветры, аналитическая модель, линейное приближение, стратификация, вращение, пограничный слой, спиральность

Теории мезомасштабных циркуляций над термически неоднородной подстилающей поверхностью посвящена обширная литература, но, ввиду сложности задачи и разнообразия возможных сочетаний параметров, далеко не все представляющие интерес ситуации достаточно исследованы даже в линейном приближении. В настоящем докладе рассмотрена теоретическая модель таких циркуляций, более общая, чем в ряде предыдущих работ. Найдено аналитическое решение в рамках линейной стационарной двумерной модели конвективных течений в полубесконечной устойчиво стратифицированной среде, вращающейся вокруг вертикальной оси. Важнейшие определяющие параметры – аналоги чисел Рэлея и Тейлора, в которых в качестве пространственного масштаба фигурирует заданный горизонтальный масштаб термических неоднородностей. Для мезомасштабных атмосферных течений характерны очень большие значения этих чисел, причем рассмотрение ограничивается предельным случаем, когда значения чисел Рэлея много больше чисел Тейлора, но меньше последних в степени $3/2$ (ситуация характерная для рассматриваемых атмосферных течений). Полученные соотношения позволяют проанализировать зависимости составляющих скорости и спиральности возникающих течений от параметров задачи. Приведены примеры численных расчетов вертикальной структуры этих возмущений.

Учет вариаций полной спиральности вследствие влияния неоднородно нагретой поверхности может оказаться важным в перспективе при диагностических исследованиях атмосферных вихрей. Представленный ясный физический механизм изменения горизонтального градиента полной спиральности, который является прогностическим индикатором неблагоприятных и опасных явлений погоды, над термически неоднородной поверхностью, по-видимому, позволит более обоснованно использовать данный индикатор в практическом аспекте.

Бароклинная неустойчивость в поверхностной геострофической модели

Калашник М.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kalashnik-obn@mail.ru

Ключевые слова: *поверхностная геострофическая модель, бароклинная неустойчивость, сдвиговые течения*

В геофизической гидродинамике атмосферу представляют слоем стратифицированной вращающейся жидкости с одной (подстилающей поверхностью) или двумя (подстилающей поверхностью и тропопаузой) горизонтальными границами. Поверхностная геострофическая модель (SQG model) развита для описания течений с нулевой потенциальной завихренностью. В безразмерных переменных функция тока таких течений удовлетворяет уравнению Лапласа (является гармонической функцией), к которому присоединяются нестационарные граничные условия – уравнения переноса плавучести на границах. С использованием известных свойств гармонических функций, в ситуации с одной границей уравнение переноса плавучести сводится к одному интегро – дифференциальному уравнению. Численные решения этого уравнения привлекались для решения важных геофизических задач. Так, атмосферные приложения включали описание динамики тропопаузы, фронтальных зон, неустойчивости точечных и распределенных вихрей.

Гораздо менее полно изучена SQG модель с двумя границами. Граничные условия модели сводятся к системе из двух нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, достаточно сложной для анализа. В докладе представлен асимптотический вариант SQG модели с двумя границами, пригодный для описания динамики крупномасштабных течений. Этот вариант формулируется в терминах системы дифференциальных уравнений в частных производных, которая обобщает двумерные уравнения Эйлера на случай присутствия вертикального сдвига скорости. Показано, что вытекающий из сформулированной системы набор законов сохранения отражает законы сохранения полной и поверхностной потенциальной энергии полной SQG модели. В рамках системы получены решения ряда задач теории бароклинной неустойчивости, согласующиеся с уже известными решениями. Показано, что в присутствии вертикального сдвига неустойчивость носит абсолютный характер, т.е. не зависит от структуры горизонтального профиля скорости. Сформулирована также обобщенная система уравнений SQG модели, дополнительно учитывающая бета - эффект и придонное экмановское трение. В рамках этой системы исследован диссипативный механизм формирования верхне-тропосферных зональных течений, изучено влияние бета - эффекта на устойчивость сдвиговых течений. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18- 05-00831) и РНФ (проект 19-17- 00248).

Бароклинная неустойчивость струйных течений, связанных с фронтальными разделами в атмосфере

Калашник М.В., Чхетиани О.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kalashnik-obn@mail.ru

Ключевые слова: *струйные течения, фронтальные зоны, бароклинная неустойчивость, поверхностная геострофическая модель*

Верхнетропосферные струйные течения (высота 8-10 км, уровень тропопаузы) впервые были обнаружены военными летчиками в конце второй мировой войны. Скорость ветра на оси струйного течения может превышать , характерный горизонтальный масштаб составляет порядка 1000 км. Струйные течения (СТ) формируются в областях с интенсивными горизонтальными градиентами температуры – высотных фронтальных зонах. С изменением динамического режима СТ в условиях глобального потепления связывают погодные аномалии прошедшего десятилетия (засуха в России 2010 г, холодные вторжения в Северной Америке).

В докладе представлены результаты теоретического исследования проблемы устойчивости СТ в рамках поверхностной геострофической модели с двумя уровнями, аналогичной модели Филлипса. Струйные течения в модели инициируются заданными распределениями плавучести (потенциальной температуры) на границах слоя атмосферы (подстилающей поверхности и тропопаузы). Кусочно-постоянные распределения в форме ступеньки и локализованного прямоугольника индуцируют соответственно изолированное струйное течение и систему из двух встречных струйных течений в верхней половине слоя атмосферы и течения с противоположным направлением в нижней половине слоя. В докладе развита линейная теория гидродинамической неустойчивости таких течений. Определен интервал неустойчивых волновых чисел, найдены аналитические выражения для инкрементов нарастания возмущений. Для изолированного СТ наиболее опасное возмущение имеет длину волны порядка 3000 км и характерное время нарастания порядка двух суток.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18- 05-00831) и РНФ (проект 19-17- 00248).

Бароклинная неустойчивость и нелинейные вассилляции в атмосфере

Калашник М.В., Чхетиани О.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kalashnik-obn@mail.ru

Ключевые слова: бароклинная неустойчивость, , метод Галеркина, нелинейные вассилляции, встречные волны Россби.

Формирование крупномасштабных вихревых образований в атмосфере Земли и других планет связывают с бароклинной неустойчивостью. В пионерских лабораторных исследованиях Хайда (1953, 1958) было показано, что развитие этой неустойчивости может приводить к установлению режима с регулярными и строго периодическими во времени колебаниями амплитуд всех параметров. Теоретические исследования этого режима - режима нелинейных колебаний или вассилляций, проводились в последующих работах Педлоски (1987) с соавторами. Наблюдаемые колебания энергетических параметров атмосферы с периодом около 24 дней и их связь с бароклинной неустойчивостью описаны в целом ряде экспериментальных работ.

В докладе представлены результаты теоретического исследования бароклинной неустойчивости течения с постоянным вертикальным сдвигом в зональном канале. Для описания динамики возмущений использована максимально усеченная поверхностная геострофическая модель. В рамках модели сформулирована динамическая система, описывающая нелинейное взаимодействие волн Россби с независимой от зональной координаты нейтральной модой. Аналитические и численные решения системы показали, что экспоненциальный рост возмущений на линейной стадии развития неустойчивости сменяется стадией ангармонических нелинейных колебаний (вассилляций). Возникновение колебаний обусловлено законом сохранения поверхностной потенциальной энергии. Численные оценки периода колебаний дают значения порядка месяца, что согласуется с результатами анализа натурных данных для атмосферы в зимний период. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18- 05-00831) и РНФ (проект 19-17- 00248).

Гидродинамическая неустойчивость поверхностных периодических течений

Калашник М.В.¹, Курганский М.В.¹, Кострыкин С.В.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
kalashnik-obn@mail.ru

Ключевые слова: Гидродинамическая неустойчивость, поверхностная геострофическая модель, периодические течения

Движения слоя стратифицированной вращающейся атмосферы описываются уравнением переноса потенциальной завихренности. Точное решение этого уравнения описывает пространственно периодическое течение, локализованное у горизонтальных границ слоя. Оно служит геофизическим прототипом системы мультиструй в атмосфере Юпитера и других планет. В докладе рассмотрены проблемы линейной и нелинейной устойчивости периодического течения. Для исследования линейной устойчивости течения с одной границей использованы два подхода. В первом подходе решение линейной задачи устойчивости разлагается в тригонометрический ряд, и инкремент нарастания возмущений находится из дисперсионного соотношения, содержащего бесконечную цепную дробь. Во втором подходе строятся маломодовые аппроксимации решения методом Галеркина. Как показано в докладе, оба подхода приводят к одинаковым зависимостям инкремента нарастания от волнового числа. Из этих зависимостей следует существование длинноволновой неустойчивости с предпочтительным горизонтальным масштабом порядка длины волны основного течения. Аналогичный результат получен и для течения с двумя твердыми границами. Метод Галеркина с тремя базисными тригонометрическими функциями использован также для изучения нелинейной динамики возмущений. Эта динамика описывается системой из трех нелинейных дифференциальных уравнений, аналогичной системе, описывающей движение симметричного волчка в механике твердого тела. Анализ решений системы, показывает, что экспоненциальный рост возмущений на линейной стадии всегда сменяется стадией устойчивых нелинейных колебаний (васцилляций). С этими колебаниями связан жизненный цикл нелинейных возмущений. Он состоит в периодическом процессе рождения и гибели в потоке системы замкнутых вихревых структур.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 19-17-00248) и РФФИ (проекты 18-05-00831, 18-05-00414).

Кластеризация плавучих примесей в океане

Кошель К.¹, Рыжов Е.², Степанов Д.¹, Berloff P.²

¹Тихоокеанский Океанологический Институт РАН, Владивосток;

²Imperial College London, United Kingdom

p.berloff@imperial.ac.uk

Ключевые слова: плавучие примеси, кластеризация, геофизическая гидродинамика

На поверхности океана есть много плавающих примесей и веществ: пластическое загрязнение (включая мусор и микропластик), разливы нефти, саргассум, планктон, лед. Сложным и плохо понимаемым образом, плавающие примеси постоянно перемещаются, перераспределяются и группируются в результате крупномасштабной циркуляции океана, мезомасштабных вихрей, субмезомасштабных и мелко-масштабных движений. Здесь под кластеризацией мы понимаем процесс накопления и агрегации примесей в структурированных и эволюционирующих во времени пространственных структурах. Плотность плавучей примеси изменяется не Лагранжевым образом из-за дополнительного эффекта сжимаемости, вызванного конвергенцией скорости. В докладе обсуждаются модели кластеризации, методы анализа, и режимы кластеризации.

Квазигеострофические вихри на равномерном зональном течении: эффекты галилеевой неинвариантности уравнений вращающейся мелкой воды

Кравцов С., Резник Г.М.

Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

greznikmd@yahoo.com

Ключевые слова: квазигеострофические движения, динамика вихрей

Галилеева неинвариантность уравнений вращающейся мелкой воды (RSW) приводит к тому, что равномерный поток без сдвига нетривиальным образом влияет на динамику локализованных вихрей даже в отсутствие бета-эффекта. Например, в 1.5 – слойной квазигеострофической (КГ) модели, которая следует из RSW модели, движение относительно равномерного зонального течения описывается тем же уравнением, что и без течения, но с бета-параметром, линейно зависящим от скорости течения U . Поэтому эволюция вихря относительно течения отличается от простого бета-дрейфа в среде без течения. Мы изучили этот эффект на примере сингулярного вихря (СВ), эволюционирующего на фоне равномерного течения. Пусть для определенности вихрь является циклоном. Эволюция вихря протекает в два этапа. На первом (квазилинейном) этапе движение СВ к северо-западу относительно течения создается вторичным диполем в окрестности СВ (бета-круговоротами). Продолжительность квазилинейной стадии быстро убывает с ростом бета при постоянной амплитуде вихря A , и с уменьшением A при фиксированном бета. На следующей (нелинейной) стадии дипольная структура в ближней области разрушается, циклонический бета-круговорот теряет связь с вихрем и постепенно исчезает. СВ сливается с антициклоническим бета-круговоротом, образуя с ним компактную вихревую пару, движущуюся к северо-западу и взаимодействующую с излученными вихрем волнами Россби. Это взаимодействие приводит к временным осцилляциям компонент скорости вихря, причем, в среднем, зональная скорость возрастает, а меридиональная остается на постоянном уровне. Зная эволюцию вихря относительно течения, можно определить ее в неподвижной системе координат. При нулевом бета СВ движется по течению и под углом к нему. При этом вихрь отстает от фонового течения, причем сопротивление фоновой адвекции максимально на квазилинейной стадии и ослабевает на нелинейной стадии. В общем случае ненулевого бета СВ может двигаться как против течения (для умеренных $U > 0$), так и по течению (для $U < 0$ или достаточно большого $U > 0$). Для умеренных западно-направленных и всех восточно-направленных течений СВ движется к северу, причем его меридиональное смещение увеличивается с ростом U .

Фазовая синхронизация турбулентных течений при периодической модуляции скорости вращения

Кривоносова О.Э., Жиленко Д.Ю.

Институт механики МГУ, Москва, Россия

olga@imec.msu.ru

Ключевые слова: геофизические течения, трехмерная и двумерная турбулентность, синхронизация, сферическое течение Куэтта

Изучению синхронизации в турбулентных течениях в атмосфере [1], так же как и в модельных турбулентных течениях [2,3], уделяется в последнее время большое внимание. Представлены результаты лабораторных экспериментов и прямого численного моделирования изотермических турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости во вращающемся сферическом слое. Синхронизация в таких течениях обеспечивается модуляцией угловой скорости вращения внутренней сферы $\Omega(t)$: $\Omega(t) = \Omega_{av}(1 + A \sin(2\pi f t + \varphi))$, где Ω_{av} – среднее значение угловой скорости, A , f – амплитуда и частота модуляции. Установлено, что в области течения на средних широтах вблизи внешней сферы как в расчете, так и в эксперименте в отсутствие модуляции наблюдается наклон спектра турбулентных пульсаций азимутальной компоненты скорости течения $-11/5$, а $DLLL < 0$, что свидетельствует о наличии трехмерной турбулентности. Для нестратифицированных изотермических течений вязкой несжимаемой жидкости это получено впервые в мире [3,4]. В остальной области течения турбулентность становится двумерной, с наклоном спектра $-5/3$ на низких частотах и -3 на высоких, при этом $DLLL > 0$ (с). С увеличением амплитуды модуляции спектр с наклоном $-11/5$ появляется в экваториальной области, а затем распространяется на средние и высокие широты, сокращая область существования двумерной турбулентности.

Фазовая синхронизация приводит к перемежаемости в виде произвольного чередования во времени участков с постоянной во времени разностью фаз между скоростью сферы и скоростью течения (слабая турбулентность), и участков с изменяющейся во времени разностью фаз (сильная турбулентность). Установлена корреляция свойств течений с границами области существования перемежаемости типа «хаос-хаос». Так, внутри этих границ синхронизация изменяет соотношение между азимутальной и меридиональной составляющими кинетической энергии течения по сравнению со стационарным вращением.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 18-08-00074 и 19-05-00028.

Литература:

1. P. Read, A. Castrejon-Pita. //Q. J. R. Meteorol. Soc. 2012, vol. 138, 1338-1349.
2. P. Read, X. Morice-Atkinson, E. Allen, Castrejon-Pita. //Chaos, 2017, 27, 127001.
3. Д. Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова // ЖТФ, 2019, 89, 7, 998-1003.
4. Д. Ю. Жиленко, О.Э. Кривоносова //Письма в ЖТФ, 2017, 43, 10, 87-94.

О неустойчивости инерционно-гравитационных волн конечной амплитуды

Курганский М.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kurgansk@ifaran.ru

Ключевые слова: *инерционно-гравитационные волны, инерционные волны, гидродинамическая неустойчивость, метод Галеркина*

Исследуется гидродинамическая неустойчивость монохроматических инерционно-гравитационных волн (ИГВ) конечной амплитуды, распространяющихся под малыми углами к вертикали или горизонтали. В обоих случаях соответствующий угол служит малым параметром в задаче, и неустойчивость исследуется методом Галеркина. Для ИГВ, распространяющихся под небольшим углом к вертикали, показано, что устойчивая плотностная стратификация является стабилизирующим фактором, а вращение жидкости дестабилизирует волну. Обратное утверждение верно для ИГВ, распространяющихся под небольшим углом к горизонтали. Предыдущий анализ коротковолновой неустойчивости монохроматических внутренних гравитационных волн конечной амплитуды, распространяющихся под малыми углами к вертикали, обобщен на случай ИГВ. В качестве вспомогательной, но методологически полезной задачи в той же математической постановке исследуется устойчивость монохроматической инерционной волны конечной амплитуды в жидкости однородной по плотности.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант 18-05-00414-а.

Исследование влияния теплового переноса в каналах сыпучей разогретой среды на ветровой вынос

Малиновская Е.А.¹, Малиновский Д.Р.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия

keup.kupupukp@yandex.ru

Ключевые слова: Ветровой вынос частиц поверхности, тепловой поток, микроконвекции у перегретой поверхности, вычислительный эксперимент, OpenFOAM

При ветровом выносе частицы поверхности размерами от 30 до 300 мкм подскакивают над поверхностью до высоты около 20 см (сальтации), частицы микронного и субмикронного размера поднимаются до высоты тысяч метров. Эти два различных типа движения связаны между собой [1]. Изменение концентраций микрочастиц зависит от температуры поверхности и воздуха [2]. Поэтому проводится изучение взаимодействий на микро-уровне в каналах пористой сыпучей среды.

Натурные эксперименты затруднены для масштабов порядка долей и десятков микрометров, что возможно в вычислительном эксперименте. Исследовалось влияние изменений температуры поверхности и скорости горизонтального потока над поверхностью на движение в пористой среде. Область, повторяющая форму воздушно-го канала между частицами поверхности одного размера при прямоугольной укладке, построена с использованием моделирования 3D-объектов.

В качестве граничных условий при численном моделировании микропроцессов в воздушных каналах между частицами на поверхности приняты следующие: температура поверхности меняли от 310° до 350° К с шагом в 10°, скорость воздушного потока на верхней границе – от 0,01 до 0,05 м/с с шагом 0,01 м/с.

Вычислительный эксперимент реализован с использованием OPEN FOAM для ламинарной модели, учитывающей теплоперенос. Величина составляющей скорости U_z восходящего потока в верхней точке выхода к горизонтальному потоку над поверхностью возрастает с увеличением температуры от 0,002 м/с до 0,0026 м/с, что определяет механизм микроконвекции у поверхности. В нижней области под слоем частиц составляющая скорости U_z отрицательна и скачком возрастает по модулю при температуре выше 330 К, что способствует отрыву от поверхности крупных сальтирующих частиц и выносу из пор частиц микронного и субмикронного размера. Изменение скорости горизонтального потока над поверхностью слабо влияет на динамику процессов в каналах.

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ 19-05-50110.

Литература:

1. Houser C. A., Nickling W. G. The emission and vertical flux of particulate matter < 10 μm from a disturbed clay-crust surface //Sedimentology. – 2001 – Т. 48 – №. 2 – С. 255-267.
2. Chkhetiani O. G. et al. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model //Atmospheric Chemistry and Physics. – 2012 – Т. 12 – №. 11 – С. 5147

Проблема генерации распределенных полей поверхностного источника песчано-пылевого аэрозоля

Малиновская Е.А.¹, Петросянц М.Т.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия, АО «СевКавНИПИ-
газ», Ставрополь, Россия
PetrosyancMT@scnigaz.ru

Ключевые слова: Ветровой вынос песчано-пылевых частиц с поверхности, топографическое воздействие, цифровая модель рельефа

Ветровой вынос песчано-пылевых частиц с поверхности более интенсивен на вершине и зависит от высоты дюны [1], ослабляется экспоненциально на подветренном склоне [2]. Отмечаются вертикальные восходящие движения воздуха [3, 4], замедление потоков у самой поверхности по наветренному склону [5] и увеличение сдвиговых напряжений [6] с приближением к вершине. Учет топографического воздействия на турбулентные напряжения Рейнольдса [7] возможен с использованием растровой цифровой модели рельефа [5]. Этот подход накладывает ограничения на масштабы области исследования, что связано с трудоемкостью процесса преобразования больших изображений в 3D-каркас обтекаемого объекта. При этом детали рельефа теряются при построении сетки поверхности. Другой подход возможен с использованием результатов вычислительного эксперимента для эталонов (геометрических объектов, имитирующих реальную топологию) [8] с данными для огрубленной 3D-модели. При поппиксельной оценке экспозиции склона поверхности методом скользящего окна [8] проводится разметка исходного растрового файла с определением наветренного склона и подветренного склонов (горизонтальные размеры расчетной области до 3х3 км). Так как интенсивность ветрового выноса частиц с поверхности связана с величиной динамической скорости, то в результате проведения серии вычислительных экспериментов установлены области с ее наибольшими и наименьшими значениями. Это позволяет провести преобразование исходного растрового изображения рельефа в карту источника песчано-пылевого аэрозоля. Можно отметить квазипериодические изменения массового потока частиц, выносимых с поверхности. Временные интервалы между максимумами выноса зависят от масштабов эоловых структур. Подобные изменения связаны с динамикой воздушного потока у поверхности. В среднем поток усиливается на 15-20% по сравнению с моделями, не учитывающими особенности эолового выноса на неоднородном рельефе.

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 20-17-00214.

Литература:

1. Dong Z.B. et al. J. of Arid Land. 2014. 6(3). 243-254.
2. Anderson R.S. Sediment. 1988. 35(2). 175-188.
3. Gay Jr S.P. J. of arid environments. 2005. 61(1). 101-117.
4. Baddock M.C. et al. Earth Surface Proc. and Landforms. 2011. 36(11). 1435-1448.
5. Malinovskaya E.A. in CITES '2019. 2019. 192-195.
6. Chapman C.A. et al. Geomorph. 2012. 151. 1-12.
7. Kroy K. et al. Phys. Review E. 2002. 66(3). 031302.
8. Burrough P.A. et al. Principles of Geogr. Inf. Systems. New York. 190. 1998.
9. Wang C. et al. Boundary-Layer Meteorol. 2019. 1-26.

Роль микроструктуры поверхности при золовом выносе

Малиновская Е.А.¹, Чхетиани О.Г.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

elen_am@inbox.ru

Ключевые слова: микроструктура поверхности, золовый вынос, сальтации, микроканалы в песчаной среде

С увеличением высоты эффективной шероховатости поток сальтирующих частиц усиливается [1], определяется кубической зависимостью от динамической скорости [2] и квадратичной от величины горизонтальной силы сопротивления [3], что влияет на эмиссию микрочастиц [4]. Сальтационный поток изменяет профиль скорости ветра у поверхности, уменьшает критическое значение напряжения сдвига [1]. Коэффициент сопротивления, определяемый отношением напряжения сдвига к скорости, возрастает в зависимости от плотности покрытия поверхности частицами [3].

Дополнительные элементами к естественной шероховатости поверхности дюны способствуют возникновению мелкомасштабных вихрей, деформирующих профиль скорости ветра [5]. Движение потока у самой поверхности по наветренному склону замедляется ближе к вершине [6], там же наблюдаются наибольшие сдвиговые напряжения [7], что увеличивает величину коэффициента сопротивления. Эти факты указывают на то, что дюну нельзя рассматривать, как монолитную однородную структуру. Это среда, состоящая из частиц, свойства которой отличаются для разных ее частей, что, в частности, связано с особенностями укладки частиц на поверхности. При слабых ветрах эмиссия микрочастиц возникает за счет тепловых конвективных потоков над нагретой поверхностью [8] и локальное снижение скорости ветра усиливает роль теплопереноса.

На основе модели взаимодействия воздушного потока с микроэлементами поверхности определены условия возникновения подъемной силы, достаточной для отрыва частицы от поверхности. Возникновение золовых структур типа микроряби определяется неоднородность укладки частиц. У вершины увеличиваются расстояния между частицами на поверхности и размеры микроканалов в песчаной среде. Увеличение напряжения сдвига на вершине с одновременными изменениями в микроструктуре поверхности приводят к уменьшению влияния касательного к поверхности потока на отрыв частицы, а вынос возможен за счет периодически возникающих при обтекании нисходящих потоков.

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 20-17-00214.

Литература:

1. Martin R.L., Kok J.F. J. Geophys. Res. 2018.123(7).1546-1565.
2. Shao Y. et al. J. Geophys. Res. 1993.98 (D7). 12719-12726.
3. Turpin C. et al. Earth Surf. Proc. and Land. 2010.35(121).1418-1429.
4. Houser C. A., Nickling W. G. Sedimentology. 2001.48(2).255-267.
5. Tamura T. et. al. Flow, Turbulence and Combustion. 2007.79(4).405-432.
6. Chapman C. A. et al. Geomorph. 2012.151.1-12.
7. Kroy K. et al. Phys. Review E. 2002.66(3).031302.
8. Chkhetiani O. G. et al. Atmos. Chem and Phys. 2012.12(11).5147.

Дисперсионное сжатие слабонелинейных волновых пакетов

Пелиновский Е.Н.^{1,2,3}, Талипова Т.Г.^{1,3}, Диденкулова Е.Г.^{1,2}

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

²*Национальный исследовательский университет - Высшая школа экономики, Нижний Новгород, Россия*

³*Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева
pelinovsky@appl.sci-nnov.ru*

Ключевые слова: *волны-убийцы, поверхностные и внутренние волны*

Дисперсионное сжатие волновых пакетов является одним из основных механизмов генерации аномально больших волн, получивших название «волн-убийц». Идея этого механизма достаточно проста: в диспергирующей среде групповая скорость зависит от частоты, и волновые пакеты с разными длинами волн могут как расходиться, так и сходиться в пространстве. Сейчас появились наблюдения реализуемости этого механизма в океане. Нелинейность не может помешать дисперсионному сжатию волновых пакетов, хотя, конечно, влияет на характеристики получаемых волн-убийц.

Здесь мы обсудим общие свойства процесса дисперсионного сжатия волновых пакетов в средах с полиномиальной (автомодельной) дисперсионной характеристикой, возникающей для многих типов длинных волн в океане, используя как приближенные, так и точные решения уравнений волнового типа.

Параметризации подсеточной квазидвумерной турбулентности класса LES, ориентированные на применение в моделях океана промежуточного разрешения

Пережогин П.А., Глазунов А.В.

Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва, Россия

pperezhogin@gmail.com

Ключевые слова: *подсеточные параметризации, backscatter, мезомасштабные вихри*

Модели океана, используемые в современных моделях климата, имеют вихредопускающее разрешение (1/4 градуса). При таком разрешении мезомасштабные вихри частично разрешаются на расчетной сетке, однако их динамика является ослабленной. Вихредопускающие модели океана могут рассматриваться как LES (Large eddy simulation) модели квазидвумерной турбулентности. Построение моделей подсеточной турбулентности хорошо изучено для случая трехмерной турбулентности, однако для случая квазидвумерной турбулентности такие работы практически отсутствуют. В докладе будет представлен априорный анализ взаимодействия разрешаемых и неразрешаемых масштабов в модельных задачах двумерной жидкости (форсированная, затухающая турбулентность) и способы параметризации диссипации и генерации энергии подсеточными вихрями: модель подобия масштабов, динамическая модель, модель обратного перераспределения кинетической энергии (backscatter) [1]. Также будет приведен априорный анализ для модельной конфигурации в модели океана NEMO и представлены результаты для стохастических и детерминистических моделей backscatter'a [2], в том числе с использованием искусственных нейронных сетей [3].

Литература:

1. Perezhogin P. A. et. al. Stochastic and deterministic kinetic energy backscatter parameterizations for simulation of the two-dimensional turbulence //RJNAMM. – 2019.
2. Perezhogin P. A. Testing of kinetic energy backscatter parameterizations in the NEMO ocean model //RJNAMM. – 2020.
3. Perezhogin P. A new data-driven subgrid 2d turbulence parameterization and comparison with conventional kinetic energy backscatter parameterizations in NEMO ocean model //EGU Abstracts. – 2020.

Применение спектрального алгоритма для вычисления коэффициентов турбулентности в модели COSMO-Ru при прогнозировании устойчивых ситуаций

Перов В.Л.¹, Ефремов С.В.², Никитин М.А.¹

¹*Гидрометцентр России, Москва, Россия*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

veniamin.perov@mail.ru

Ключевые слова: устойчивый пограничный слой атмосферы, функции устойчивости для вертикальных и горизонтальных коэффициентов турбулентности, система прогноза погоды COSMO-Ru.

В докладе излагаются основные результаты применения спектрального алгоритма для расчета турбулентных потоков в модуле пограничного слоя атмосферы (ПСА) модели COSMO-Ru. Большую роль при вычислении коэффициентов турбулентности играют функции устойчивости. В отличие от используемого в настоящее время подхода, основанного на эмпирических функциях устойчивости, спектральный алгоритм позволяет получить вид этих функций теоретически. Это позволяет снять проблемы расчета турбулентных потоков для случаев устойчивой и сильно устойчивой стратификаций.

Проведенные расчеты позволили исследовать влияние анизотропности турбулентности в ПСА и показали уменьшение средней ошибки поля температуры на высоте 2 м и на нижних уровнях модели по сравнению с расчетами по исходной модели.

Литература:

1. Перов В.Л. Расчет коэффициентов турбулентного перемешивания на основе спектрального алгоритма и его использование в модели COSMO-RU // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 81-94.
2. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-71.

Система COSMO-Ru краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: состояние и перспективы развития на суперкомпьютере Cray XC40-LC “Росгидромет”

Ривин Г.С.^{1,2}, Розинкина И.А.^{1,2}, Астахова Е.Д.¹, Блинов Д.В.¹, Бундель А.Ю.¹, Кирсанов А.А.¹, Шатунова М.В.¹, Чубарова Н.Е.^{1,2}, Алферов Д.Ю.¹, Варенцов М.И.^{1,2}, Захарченко Д.И.^{1,2}, Копейкин В.В.¹, Никитин М.А.¹, Полухов А.А.^{1,2}, Ревокатова А.П.¹, Татаринович Е.В.¹, Чурюлин Е.В.^{1,2}

¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

gdaly.rivin@mail.ru

Ключевые слова: бесшовное прогнозирование, конфигурация модели, краткосрочный численный прогноз погоды, негидростатическая модель атмосферы, суперкомпьютерное моделирование.

Система COSMO-Ru негидростатического краткосрочного численного прогноза погоды (ЧПП) для территории России и прилегающих регионов функционирует в Гидрометцентре России с 2009 г. и включает в себя конфигурации COSMO-Ru (шаги сеток от 13.2 до 1 км) негидростатической модели COSMO одноименного консорциума, в состав которого входит Росгидромет. После проведенных оперативных испытаний в 2011, 2016 и 2018 гг. система COSMO-Ru признана Центральной методической комиссией Росгидромета базовой отечественной технологией численного краткосрочного прогноза погоды. Система полностью соответствует уровню аналогичных систем ведущих метеослужб мира как по показателям успешности прогнозов, так и по примененным технологическим решениям. Продукция COSMO-Ru четыре раза в сутки рассылается в подавляющее большинство прогностических центров Росгидромета, являясь одной из наиболее востребованных.

Применение современных технологических решений позволяет адаптировать COSMO-Ru к широкому спектру задач метеорологического обеспечения и приложений. Важными примерами является создание и успешное применение специальных версий для метеобеспечения Олимпийских игр Сочи-2014, Универсиад Казань-2013 и Красноярск-2019 на сетках 2,2 км и для горных районов 1,1 км. В 2018 г. началась разработка версии на сетках с шагом 1 км и менее для Московского региона с описанием урбанизированных территорий [1].

В настоящее время происходит значительное преобразование системы COSMO-Ru в связи с переходом в консорциуме COSMO от модели COSMO для ограниченной территории к бесшовной модели ICON нового поколения (разработка Немецкой службы погоды и Метеорологического института им. М. Планка (г. Гамбург, Германия)) и предназначенной для численного прогноза погоды, LES-экспериментов и проведения исследования изменения климата [2].

В докладе будут представлены результаты, полученные в последние годы, по развитию системы ЧПП COSMO-Ru и перспективы ее дальнейшего совершенствования на суперкомпьютере Cray XC40-LC “Росгидромет”.

Литература:

1. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М. и др. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и метеосуловий опасных явлений с высокой детализацией для Московского региона // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5-19.
2. Giorgetta M.A. et al. ICON-A, the Atmosphere Component of the ICON Earth System Model: I. Model Description // J. Adv. Model. Earth Syst. 2018. V. 10. № 7. P. 1613–1637.

Влияние конвективных валов на процесс быстрой интенсификации циклонического вихря

Сухановский А.Н., Попова Е.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

san@icmm.ru

Ключевые слова: лабораторный аналог тропического циклона; быстрая интенсификация вихря, процесс теплообмена в пограничном слое

Исследовано влияние конвективных валов на процесс быстрой интенсификации лабораторного аналога тропического циклона. Появление когерентных конвективных структур, таких как термики и валы, регистрировались с помощью различных оптических методов и измерений температуры. Двумерные поля скорости использовались для исследования структуры и характеристик потока. Тепловой поток от нагревательной пластины к жидкости измерялся напрямую. Полученные результаты ясно показывают, что быстрая интенсификация лабораторного аналога тропического циклона тесно связана с процессом теплообмена в пограничном слое. Образование вторичных конвективных структур сильно увеличивает теплоотдачу и интенсивность конвективной циркуляции. Интенсивность радиального конвергентного течения является решающим аспектом для усиления циклонического вихря, следовательно, быстрое изменение теплопередачи является фактором, который оказывает существенное влияние на динамику лабораторного вихря. Временные ряды максимальных радиальных и азимутальных скоростей находятся в хорошем качественном согласии с таковыми из теоретической модели. Показано, что средний квадрат скорости линейно зависит от разницы температур между притоком и поверхностью нагрева.

Работа проведена при поддержке гранта правительства Пермского края С-26/788

Атомно-молекулярные эффекты в геофизической гидродинамике

Чашечкин Ю.Д.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

yulidch@gmail.com

Ключевые слова: течения, энергия, структура, фундаментальная система, полные решения, лигаменты, волны, вихри, лабораторный эксперимент

Традиционно в геофизической гидродинамике изучаются крупномасштабные компоненты – волны, вихри, струи, следы и их наборы. В основу описания динамики течений положены редуцированные версии фундаментальных уравнений (теории волн, пограничных слоев, вихрей) и конститутивные теории турбулентности. Интерес представляет поиск компонентов течений, определяемых атомно-молекулярными процессами, которые характеризуют тонкие явления на границах и в толще жидкости или газа в модели непрерывной среды. В развиваемую модель включена полная энергия, учитывающая кинетическую, потенциальную и внутреннюю энергию, определяемую термодинамическими потенциалами [1]. Учет энергии позволяет учитывать и «медленные» гидродинамические процессы, и быстрые атомно-молекулярные, которые осуществляют конверсию внутренней энергии в другие формы, вызывают быстрые изменения термодинамических (плотности, температуры, давления) и механических (импульса, энергии движения) величин. Примерами сильного влияния быстрой конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии служат тонкие процессы импакта капли [2, 3].

Основу теории течений составляет система фундаментальных уравнений механики жидкостей [4], с граничными условиями и уравнениями состояния для полной энергии и термодинамических величин [1]. Система анализируется с учетом условия совместности, определяющего ее ранг и степень характеристического уравнения [5]. Регулярные и сингулярные решения линеаризованной системы положены в основу классификации набора тонкоструктурных компонентов – лигаментов, волн и вихрей [6]. В линейном и нелинейном приближениях рассмотрены двумерные задачи обтекания полосы в широком диапазоне значений стратификации, угла атаки, наклона траектории и скорости тела, включающем и ползучие течения, индуцированные диффузией на топографии [7], и нестационарные вихревые режимы. Вычислительные технологии позволяют рассчитывать динамику и тонкую структуру течений, согласующиеся с данными прецизионных исследований, независимо выполненных в различных лабораториях.

Опыты проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН» при поддержке РНФ (проект 19-19-00598).

Литература:

1. Feistel R. Ocean Sci. 2018. 14, 471–502.
2. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. // Докл. РАН. 2018. 481(2), 145–150.
3. Чашечкин Ю.Д. Изв. РАН. Физ. атм. океана. 2019. 55(3), 285–294.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986.
5. Chashechkin Yu.D. Math. Mod. Nat. Phen. 2018. 13(2), 1–29.
6. Chashechkin Yu.D. Phys. Astron. Intl. J. 2018. 2(2), 105–108.
7. Chashechkin, Y. D., Zagumennyi, I. V. Phys. Scripta. 2019. 94(5), 1–17.

Связь крупномасштабной антициклонической циркуляции в Атлантике с атмосферной циркуляцией

Щевьев В. А.

Институт водных проблем РАН

shtshev@rambler.ru

Ключевые слова: *Крупномасштабные антициклонические циркуляции в океанах, приливообразующие силы Луны и Солнца,*

Существование гигантских океанских антициклонических круговоротов в северных и южных частях трех океанов объясняют действием соответствующих атмосферных субтропических антициклонических центров. Западные ветви этих круговоротов вследствие, так называемого β эффекта, образуют интенсивные узкоструйные пограничные течения. (Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. 1982).

Но существуют ряд работ, в основе которых гипотеза И. Канта (1754), согласно которой Луна (и Солнце) создают движущую силу, которая гонит воду вдоль экватора с востока на запад. Таким образом возникают экваториальные течения. Они дают начало крупномасштабным антициклоническим циркуляциям. Но так - же эти силы действуют не только на океан, но и на атмосферу, и на все части Земли. Наблюдаются заметные приливы в атмосфере. Такой точки зрения придерживаются более 20 авторов.

Владимир Зенин (Австралия) в статье «Луна является основной движущей силой глобальной циркуляции воздуха» объясняет этот феномен. «Общепринято, что глобальная циркуляция воздуха обусловлена градиентом давления в атмосфере. В предположении, что атмосферные и океанские приливы контролируются одними и теми же гравитационными силами и что газы и жидкости имеют одинаковые закономерности, можно без сомнений заключить, что атмосферные приливы создают глобальную циркуляцию атмосферы».

Таким образом: «Совпадение местоположения гигантских антициклонических круговоротов в океане и атмосфере объясняется одной причиной их существования – воздействием приливообразующих сил Луны и Солнца на водные и воздушные массы».

Литература:

1. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. 1982). Синоптические вихри в океане. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 264с.
2. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. Т. 1,2. 1981. М. Мир, 365 с.
3. Щевьев В. А. Физика течений в океанах, морях и в озерах. 2012 г. Изд-во LAMBERT ISBN: 978-3-8484-1929-6
4. Щевьев В.А. О причине образования течений в океанах, внутренних морях и крупных озерах. М. 2002 г. ГОИН. Депонировано ВИНТИ 21.06.2002. № 1159-B2002. 14 с.

Чувствительность амплитуды годового хода приповерхностной температуры к росту среднегодовой температуры в INM-CM5

Александров Г.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

g.alexandrov@ifaran.ru

Ключевые слова: верификация моделей климатической системы, INM-CM5, амплитудно-фазовый анализ

В 2006 году Елисеев и др. [1] провели амплитудно-фазовый анализ результатов численных экспериментов, проведенных на климатических моделях, и обнаружили, что на значительной части территории суши наблюдается отрицательная корреляция между изменением амплитуды годового хода приповерхностной температуры (АГТ) и изменением среднегодовой температуры (СГТ). Так как свойства моделей климатической системы могут меняться по мере их развития, аналогичное исследование в отношении климатических моделей «шестого поколения» (т.е. моделей, включенных в ансамбль CMIP6) представляется вполне актуальным и, как показал анализ результатов численных экспериментов, проведенных на пятой версии климатической модели ИВМ РАН (INM-CM5) [2], небезынтересным. Особенный интерес вызывает то, что в экспериментах INM-CM5 для SSP2-4.5 и SSP5-8.5 АГТ в центральной части Русской равнины начинает снижаться только во второй половине XXI-го века. До этого АГТ растет (SSP2-4.5) или остается примерно постоянным (SSP5-8.5). Для выяснения причин, по которым это может происходить, предлагается провести анализ результатов экспериментов, проведенных на других климатических моделях из ансамбля CMIP6.

Литература:

1. Елисеев А.В., Мохов И.И., Гусева М.С. Чувствительность амплитудно-фазовых характеристик годового хода приповерхностной температуры к изменению среднегодовой температуры: Сравнение данных реанализа и результатов расчетов с климатическими моделями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. - Т.42. - № 3. - С. 326-340.
2. Volodin E., Gritsun A. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 //Earth System Dynamics. – 2018. – Т. 9. – №. 4. – С. 1235-1242.

Воспроизведение изменений годового хода приземной температуры в центральной части Русской равнины моделями климатической системы

Александров Г.А.

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
g.alexandrov@ifaran.ru*

Ключевые слова: *годовой ход температуры, модели климатической системы, изменение климата*

Глобальное изменение климата проявляется не только в росте среднегодовых значений температуры воздуха (СГТ), но и в изменениях ее годового хода. Поэтому при диагностике изменений климата и верификации моделей климатической системы признается необходимыми принимать во внимание амплитудно-фазовые характеристики годового хода температуры [1]. Одной из таких характеристик является амплитуда годового хода приземной температуры (АГТ). Тенденция к снижению АГТ наблюдается в Северном полушарии, начиная примерно с 1950 года [2]. Она связана с сезонной асимметрией повышения приповерхностной температуры: зимние температуры растут быстрее летних. Отрицательная корреляция между АГТ и СГТ широко распространена в Северном полушарии и имеет теоретическое объяснение [3]. Тем не менее, результаты проведенного исследования показали, что она воспроизводится далеко не всеми моделями климатической системы. CESM2 и INM-CM5-0 не воспроизводят ее ни в одном узле географической сетки координат, заключенном между 31-й и 42-й восточной долготой и 51-й и 59-й северной широтой; CanESM2 и MIROC6 воспроизводят ее для отдельных узлов; GFDL-ESM4, BCC-ESM1, MPI-ESM1-2_LR и HadGEM3-GC31-LL – фрагментарно; и только MRI-ESM2-0 и IPSL-CM6A-LR – повсеместно.

Литература:

1. Eliseev A.V., Mokhov I.I. Amplitude-phase characteristics of the annual cycle of surface air temperature in the Northern Hemisphere // *Adv. Atmos. Sci.* 2003. V. 10. №1. P. 1-16.
2. Stine A.R., Huybers P., Fung I.Y. Changes in the phase of the annual cycle of surface temperature // *Nature*. 2009. Vol. 457, № 7228. P. 435–440.
3. Елисеев А.В., Мохов И.И., Гусева М.С. Чувствительность амплитудно-фазовых характеристик ... // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т.42. № 3. С. 326-340.

Оценка изменений удельного потребления тепла для отопления зданий по сценариям изменения климата, предполагаемых моделью INM-CM5

Александров Г.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

gleb@ifaran.ru

Ключевые слова: изменение климата, энергопотребление, INM-CM5

Значительная часть энергопотребления в Москве и других городах Русской равнины связана с отоплением зданий. Минимальный уровень энергопотребления на отопление жилого сектора городов, как было показано ранее [1], зависит от региональных климатических условий. Удельная потребность тепла (УПТ) в Москве – 206 кВтч/кв.м, в Санкт-Петербург – 202 кВтч/кв.м, в Берлине - 120 кВтч/кв.м, в Лондоне - 86 кВтч/кв.м.

В данной работе метод расчёта климатически обусловленного минимума энергопотребления [1] применяется к перспективным оценкам изменения среднемесячной температуры воздуха в центральной части Русской равнины, сделанным Володиным и Грицуном [2] для различных сценариев социально-экономического развития (SSP). Показано, что для сценария SSP1-2.6 УПТ в среднем для центральной части Русской равнины в период 2015-2100 гг. практически не изменяется (растёт со скоростью 0.08 кВтч/кв.м в год), для сценария SSP2-4.5 УПТ снижается со скоростью 0.46 кВтч/кв.м в год, то есть снизится примерно на 18% к 2100 году, а для сценария SSP5-8.5 - примерно на 39% (скорость снижения УПТ в этом сценарии достигает 1,03 кВтч/кв.м в год).

Литература:

1. Александров Г. Г., Гинзбург А. С. Климатически обусловленный минимум энергопотребления в жилом секторе городов //ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ПРИЧИНЫ, РИСКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ, ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ КЛИМАТ-2019. – 2019. – Т. 26. – С. 160.
2. Volodin E., Gritsun A. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 //Earth System Dynamics. – 2018. – Т. 9. – №. 4. – С. 1235-1242.

Анализ связи стратосферной циркуляции с аномалиями температуры на Северо-западе Российской Федерации

Алексеева Е.Г., Анискина О.Г.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

E.Alekseeva-rshu@yandex.ru

Ключевые слова: аномальное потепление, стратосферная циркуляция, взаимодействие тропосферы и стратосферы.

Изучение аномалий приземной температуры воздуха, которая является одной из важнейших характеристик изменяющегося климата, представляет собой актуальную задачу, как для прикладной деятельности (долгосрочные прогнозы), так и для современной науки.

В настоящей работе сделана попытка исследовать статистические связи аномалий температуры воздуха на Северо-Западе Российской Федерации и характеристик циркуляции стратосферы. Для этих целей использовалась база данных проекта European Climate Assessment & Datasetproject (ECA & D) (<https://www.ecad.eu/>), содержащая данные наблюдений национальных Европейских метеорологических служб, проверенные на однородность и репрезентативность. В анализе использовались данные о максимальной температуре (Тмакс) на 55 метеорологических станциях Европейской и Центральной территории Российской Федерации, ряд наблюдений на которых охватывал период с 1950 по 2019 год. Для характеристики циркуляции стратосферы использовались данные реанализа UK Met Office (<http://www.euro4m.eu/datasets.html>).

Проанализирована связь аномалий температуры с Северной кольцевой модой (СКМ), которая характеризуется первой ортогональной эмпирической функцией полей геопотенциальной высоты. Выявлена связь знака аномалии СКМ со знаком аномалии приземной температуры воздуха. Получено, что наступлению периода сильных аномалий температуры воздуха у подстилающей поверхности предшествует аномалия СКМ в верхней стратосфере, которая постепенно распространяется вниз. Период распространения сигнала от стратосферы до подстилающей поверхности составляет 10-20 дней. Также наблюдается связь формы циркумполярного вихря с интенсивностью аномалий температуры.

Отношение сигнал/шум в задачах теории климата

Бекряев Р.В.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

bekryaev@mail.ru

Ключевые слова: изменения климата, отношение сигнал/шум, параметр нецентральности

Рассматривается отношение сигнал/шум в задачах идентификации климатических изменений. Показано, что ведущую роль при оценке такого отношения занимают статистики, подчиняющиеся семейству нецентральных распределений. Продемонстрирована идентичность отношения сигнал/шум и параметра нецентральности. Рассмотрены свойства рассматриваемых статистик, предложены алгоритмы статистической оценки параметра нецентральности и его доверительных границ. На примерах простых статистических моделей и результатов глобальных климатических моделей показана эффективность предлагаемого подхода.

Сравнение различных биоклиматических характеристик для крупных городов России

Белова И.Н.¹, Кривенок Л.А.¹, Докукин С.А.^{1,2}, Фалалеева В.А.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

iya@ifaran.ru

Ключевые слова: эквивалентно-эффективная температура, PET, биоклиматические характеристики

Городской остров тепла изучается различными группами исследователей: географами, климатологами, физиками, метеорологами. Поскольку исследования проводились иногда параллельно друг от друга, цели исследований ставились различные, в результате появились различные способы оценки эффектов, возникающих в городских агломерациях.

Эквивалентно-эффективная температура характеризует тепловую чувствительность человека в тени используется как один из основных методов оценки состояния организма человека под влиянием комбинации метеорологических факторов [1].

Эквивалентно-эффективную температуру, ET , °C [1], рассчитывается по формуле А. Миссенара [2]:

как функция температуры T , °C, относительной влажности f , %, и скорости ветра на высоте 1.5 м v , $m\ s^{-1}$:

$$ET_2 = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014f + \frac{1}{1.76 + 1.4v^{0.75}}} - 0.29T \left(1 - \frac{f}{100} \right)$$

В модели RayMan [4] можно получить оценку параметра T_{mrt} .

В [5] также обсуждается биоклиматический индекс PET, в расчёте которого используются метеорологические данные.

В настоящей работе сравниваются различные биоклиматические параметры на примерах крупных городов России.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-05-00254 Антропогенное воздействие и обратные связи в атмосферном пограничном слое урбанизированных территорий.

Литература:

1. Belova IN, Ginzburg AS, Krivenok LA 2018 *Energy Procedia* **149** 373–379
2. Guidelines for specialized economic services for climate information, products and services Edited by NV Kobysheva 2008 Saint Petersburg
3. Konstantinov PI, Varentsov MI, Malinina EP 2014 *Urban Climate* **10** 563–572
4. Matzarakis A, Rutz F & Mayer H 2007 *Int J Biometeorol* **51** 323–334
5. Höppe P. 1999 *Int J Biometeorol* **43** (2) 71–75

Модификация климатической модели океана ИВМ РАН

Благодатских Д.В.¹, Дебольский А.В.², Мортиков Е.В.^{2,3}, Оноприенко В.А.¹, Яковлев Н.Г.³

¹Московский центр фундаментальной и прикладной математики

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва, Россия

blago1958@mail.ru

Ключевые слова: *схема интегрирования по времени, климатическая модель океана*

В рамках модели океана, разрабатываемой как составная часть климатической модели ИВМ РАН, используется оригинальная схема расщепления физических процессов по времени. В данном докладе рассматривается влияние выбора схемы интегрирования по времени и расщепления по физическим процессам на конфигурацию течений в экваториальной области от на задачах в идеализированной постановке.

Чувствительность и естественная изменчивость в климатической модели

Володин Е.М.

Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва, Россия

volodinev@gmail.com

Ключевые слова: модель, климат, отклик, чувствительность, естественные колебания, среднеквадратичное отклонение

В настоящее время одной из основных проблем моделирования изменений климата остается оценка чувствительности реальной климатической системы к заданному воздействию, например, к удвоению концентрации углекислого газа. По данным СМIP6, равновесная чувствительность современных климатических моделей изменяется от 1.8 до 5.6 градуса. Один из подходов к определению равновесной чувствительности реальной климатической системы состоит в том, чтобы сравнить величину естественных колебаний. По результатам СМIP6, существует корреляция между величиной естественной изменчивости среднегодовой глобальной температуры, и равновесной чувствительностью. Большая чувствительность к внешнему воздействию означает и большую величину естественных колебаний.

Данное утверждение проверяется с помощью численных экспериментов с двумя версиями модели климата ИВМ РАН. Изменения в параметризации облачности приводят к заметному изменению в равновесной чувствительности, от 1.8 К до 3.8 К. Однако, изменения величины естественной изменчивости среднеглобальной температуры при этом почти не происходит, а среднеквадратичное отклонение температуры поверхности отдельно в каждом географическом регионе даже в основном уменьшается.

В то же время, в третьей версии модели климата сделаны изменения в параметризации облачности, связанные с формированием облачности атмосферного пограничного слоя в условиях влажной конвекции. Это немного уменьшает величину равновесной чувствительности модели с 3.8 до 3.5 градуса, но увеличивает величину естественной изменчивости глобально осредненной среднегодовой температуры, а также увеличивает величину естественных колебаний температуры в большинстве географических районов, в том числе изменчивость, связанную с Эль-Ниньо и Тихоокеанским декадным колебанием.

Таким образом, связь чувствительности и естественной изменчивости оказывается неоднозначной.

О влиянии Восточно-Атлантического колебания на завихренность касательного напряжения трения ветра над Черным морем в осенне-зимний период

Губарев А.В., Аверьянова Е.А., Полонский А.Б.

Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

alexgub@inbox.ru

Ключевые слова: *Восточно-Атлантического колебание, завихренность касательного напряжения трения ветра, Черное море, MERRA2, изменчивость*

Восточно-Атлантического колебание (ВАК) - один из основных сигналов, определяющих межгодовую изменчивость гидрометеорологических полей над Европой, включая Черноморский регион [1]. В настоящей работе изучается влияние ВАК на завихренность касательного напряжения трения ветра (ЗКНТВ) над Черным морем (ЧМ), которая определяет интенсивность циркуляции в море. Использовались срочные данные ре-анализа MERRA2 [2] по компонентам вектора ветра (U, V), по которым рассчитывались среднемесячные величины ЗКНТВ, и ряд ежемесячных значений индекса ВАК за 1980-2019 гг. [3]. Для каждого месяца строился временной ряд индекса ВАК, и удалялись значимые полиномиальные тренды. Для выделения «чистого» сигнала, соответствующего влиянию ВАК на ЗКНТВ использовался метод разностных композитов. В отличие от [1], принималась во внимание нестационарность рядов ВАК. Показано, что пространственная структура композитов сохраняется внутри сезонов, но принципиально меняется от осени к зиме. В сентябре-октябре области значимого усиления циклонической завихренности в положительную фазу ВАК (ВАК+) расположены в центре восточного циклонического круговорота ЧМ, вблизи побережья Турции и Краснодарского края. В фазу ВАК+ с ноября по февраль над большей частью акватории ЧМ за исключением прибрежных областей усиливается антициклоническая завихренность. В эти месяцы области значимого усиления антициклонической завихренности приходятся на западный и восточный циклонические круговороты ЧМ, северо-западный шельф, а значимого усиления циклонической завихренности – на западную, восточную и южную прибрежные части ЧМ. Таким образом, положительная фаза ВАК в осенне-зимний период влияет на сезонный ход ЗКНТВ, уменьшая его амплитуду на большей части акватории ЧМ.

Литература:

1. А. Б. Полонский, И. А. Кибальчич Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. №1. С. 5-17.
2. Ronald G., McCarty W., Suarez M.J. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // Journal of climate. 15 July 2017. Vol. 30. P. 5419–5454.
3. ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh

Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы

Дембицкая М.А., Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И., Парфенова М.Р.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

prokofyevamaria@yandex.ru

Ключевые слова: Арктика, приток атлантической воды, Баренцево море, мезоциклоны, морской лед

На основе результатов ансамблевых расчётов с использованием региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики исследовано влияние притока океанических вод в Баренцево море на концентрацию морских льдов и характеристики атмосферы в зимние месяцы. Результаты ансамблевых модельных расчётов показали определяющую роль вариаций притока океанических вод в Баренцево море на изменчивость режима морских льдов и приповерхностной температуры воздуха, а также статическую устойчивость атмосферы в зимний период, представляющую собой важный индикатор пространственно-временной изменчивости полярных мезоциклонов в Арктическом регионе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов (№18-05-60216, 20-55-14003).

Циклоническая активность в Арктике и тенденции их изменений

Дембицкая М.А., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

aseid@ifaran.ru

Ключевые слова: Арктика, циклоническая активность, климатические модели, реанализ, RCP сценарии

Проведен анализ циклонической активности в Арктике для современного режима с использованием ансамбля региональных климатических моделей (РКМ) Arctic-CORDEX. Также получены оценки возможных изменений характеристик арктических циклонов при антропогенном сценарии RCP8.5 для XXI века. Анализ проведен зимних (декабрь-февраль) и летних (июнь-август) циклонов. Большинство региональных моделей показывают увеличение повторяемости зимних циклонов и уменьшение летних циклонов к концу XXI века. Также циклоны становятся менее интенсивными зимой, и, наоборот, более интенсивными летом.

Зимой возможное увеличение повторяемости циклонов отмечается над заливом Баффина, в Баренцевом море, а уменьшение над Карским морем. Летом увеличение повторяемости циклонов отмечается над центральной Арктикой, Гренландским морем и уменьшение над Норвежским и Карским морями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов (№18-05-60216, 20-55-14003).

Модельные оценки вклада природных и антропогенных потоков парниковых газов в изменения климата в 21 веке

Денисов С.Н.¹, Елисеев А.В.^{1,2,3}, Мохов И.И.^{1,2,4}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

denisov@ifaran.ru

Ключевые слова: углеродный цикл, эмиссии парниковых газов, региональное моделирование

Анализ способности природных резервуаров поглощать и высвобождать в атмосферу парниковые газы, включая углекислый газ и метан, требует адекватного учета углеродного баланса различных экосистем, в том числе бореальных лесов и болот. Проведена серия численных расчетов с использованием модели Земной системы, развиваемой в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и на кафедре физики атмосферы МГУ, для оценки вклада антропогенных и природных эмиссий в атмосферу углекислого газа и метана в разных регионах [1]. Проведено сравнение вклада эмиссий с территории России, Китая, США, а также Канады в глобальные изменения климата в 21 веке при различных сценариях антропогенных эмиссий.

Влияние импульсных выбросов различных парниковых газов на изменение климата можно сравнить, используя широко распространенные упрощенные показатели, такие как потенциал глобального потепления или потенциал изменения глобальной температуры. Для оценки суммарного влияния потоков парниковых газов за выбранный период вводится кумулятивный потенциал, основанный на модифицированном потенциале изменения глобальной температуры.

Показано, что изменение климатических условий при различных сценариях антропогенных воздействий может сильно влиять на показатели влияния парниковых газов на климатическую систему, особенно на больших временных горизонтах. В современных климатических условиях природные потоки углекислого газа и метана с территории России, в отличие от других рассматриваемых регионов, в целом оказывают стабилизирующее влияние на климат. К концу XXI века согласно модельным оценкам при всех сценариях антропогенных воздействий эта стабилизирующая способность значительно снижается, а вклад природных потоков парниковых газов в атмосферу с территорий США, Китая и Канады в потепление возрастает.

Литература:

1. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO₂ и CH₄ в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады АН. 2019. Т. 488. № 1. С. 595–601.

Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультideкадной осцилляции

Дианский Н.А.^{1,2,3}, Багатинский В.А.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова Физический факультет, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва, Россия

³Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова Росгидромета, Москва, Россия

nikolay.diansky@gmail.com

Ключевые слова: Атлантическая мультideкадная осцилляция (АМО), Северная Атлантика, термохалинная циркуляция океана, климат

Изучаются зонально-осредненные климатические тренды и аномалии потенциальной температуры и солёности вод Северной Атлантики (СА) в различные периоды Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО) за последние 70 лет по данным объективных океанских анализов EN4 и WOA2013 и реанализов GFDL, ESTOC, ORA-S4 и GECCO2. Выявлены одинаковые закономерности изменчивости термохалинных полей Северной Атлантики, что повышает достоверность полученных выводов. Анализ долгопериодного тренда изменений температуры и солёности показывает, что, несмотря на потепление и осолонение верхнего слоя СА, в глубинных слоях наблюдается похолодание и распреснение, которые связываются с таянием льдов Гренландии, выносом распресненных вод из Северного Ледовитого океана и затягиванием этих холодных и более пресных вод в глубинные слои. Результаты композитного анализа зонально-осредненных детрендрованных аномалий температуры и солёности вод СА показали, что в тёплые периоды АМО по сравнению с холодными для данных анализов EN4 и WOA2013 наблюдается потепление и осолонение в верхнем 1-км слое СА, а ниже 1-км слоя наблюдаются значительные области похолодания и распреснения. Анализ динамики зонально-осредненных аномалий температуры и солёности в последовательные периоды, приуроченные к временной изменчивости индекса АМО, выявил, что эти аномалии распространяются по ходу функции тока атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ), рассчитанной с помощью модели океана INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Показано, что положительные и отрицательные аномалии как температуры, так и солёности распространяются по ходу движения вод в АМОЦ вокруг ее ядра, опускаясь в глубинные слои океана примерно на 60°N и поднимаясь на поверхность на 25°N, сменяя друг друга с периодом около 60 лет. Можно предположить, что благодаря этому формируются и сами тёплые и холодные фазы АМО. В среднем рассчитанные функции тока АМОЦ по всем используемым данным похожи друг на друга. Однако, в своих трендах и разностях композитов аномалий функции тока АМОЦ реанализов сильно отличаются как между собой, так и от данных объективных анализов EN4, WOA13. Причем основная проблема заключается в том, какого знака эти климатические тренды и разности композитов аномалий функции тока АМОЦ.

Связи мод изменчивости температуры и толщины верхнего слоя Северной Атлантики с климатическими индексами

Дианский Н.А.^{1,2,3}, Сухонос П.А.⁴

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

³Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова Росгидромета, Москва, Россия

⁴Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия

nikolay.diansky@gmail.com

Ключевые слова: эмпирические ортогональные функции, верхний квазиоднородный слой, Северная Атлантика

Исследуется межгодовая и мультidesятилетняя изменчивость температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) Северной Атлантики (СА) с помощью разложения по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ). Для этого используются среднемесячные данные о температуре океана и толщине ВКС взятые из массива ре-анализа океана ORA-S3 за период 1959–2011 гг.

Анализ основных мод изменчивости температуры и толщины ВПС в СА показал следующее. Три ведущих ЭОФ описывают более 50% общей изменчивости температуры и толщины ВПС. Первая ЭОФ показывает когерентную мультidesятилетнюю изменчивость температуры и толщины ВКС в СА. Несмотря на некоторые различия пространственной структуры для отдельных месяцев, эта ЭОФ является проявлением Атлантической мультideкадной осцилляции (АМО). Вторая ЭОФ для колебаний температуры ВПС в зимне-весенний период характеризуется пространственной структурой с противоположными знаками в разных широтных зонах СА. Вклад этой ЭОФ в общую изменчивость температуры ВКС составляет около половины вклада первой ЭОФ. Эта ЭОФ обусловлена Североатлантическим колебанием (САК). Вторая ЭОФ для вариаций температуры ВПС в летне-осенний период характеризуется пространственной структурой с изменениями температуры ВКС одного знака в восточной части экваториальной Атлантики, Североатлантическом и Восточно-Гренландском течениях и другого знака на остальной части акватории. Эта ЭОФ соответствует Атлантической меридиональной моде (АММ). Третья ЭОФ для колебаний температуры ВКС в январе совпадает с Восточноатлантическим колебанием (ВАК). Однако ее вклад в общую изменчивость температуры ВКС невелик. Таким образом, самая низкочастотная мода является отражением эволюции АМО, которую можно ассоциировать с колебаниями термохалинной циркуляции в СА. Вторая и третья моды ЭОФ являются реакцией ВКС на атмосферное воздействие, определяемое САК, АММ и ВАК. Причем вторая мода температуры ВКС имеет различную природу в холодный и теплый период года.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант 17-17-01295) и РФФИ (грант 18-05-01107).

Сравнение численного прогноза дальности видимости в аэропортах Московского узла

Зароченцев Г.А., Рубинштейн К.Г.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
xzty@mail.ru

Ключевые слова: прогноз погоды, численной моделирование, приземный слой, туманы

Туман – это явление, вызванное образованием суспензии взвешенных капелек воды или мелких кристаллов льда с массовой концентрацией $0.015-0.02 \text{ г/м}^3$ и снижающее значение горизонтальной дальности видимости до 1км или менее. Возникновение подобной суспензии вызывает серьезные проблемы при интенсивном движении транспорта на автотрассах или в аэропортах, поскольку взлет и посадка самолетов осуществляется в ручном режиме при помощи наблюдаемых ориентиров. Прогноз подобных опасных явлений может способствовать безопасности жизнедеятельности населения.

В данной работе было произведено сравнение нескольких общепринятых численных моделей прогноза дальности видимости, а также модели, разработанной авторами работы, с данными наблюдений за приземной дальностью видимости в аэропортах Московского узла. Архив непрерывных данных прогнозов и данных наблюдений составил 4 месяца.

Анализ восстановления арктического климата с помощью глобальной и региональной модели в десятилетнем эксперименте

Зароченцев Г.А.¹, Рубинштейн К.Г.¹, Ткачук С.В.¹, Игнатов Р.Ю.²

¹*Гидрометцентр России, Москва, Россия*

²*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук,
Москва, Россия
xzty@mail.ru*

Ключевые слова: *арктика, климат, региональная модель*

Арктический регион играет важную роль в формировании процессов, оказывающих существенное влияние на климатическую систему Земли. По сравнению с более южными регионами, климат Арктики формируется в условиях значительного дефицита солнечного потока тепла, который отчасти восполняется климатической системой за счет внутренних термодинамических процессов и переноса тепла из более южных областей. Изменение глобальной температуры поверхности Земли, а также усиление механизма обратной связи температура-альбедо приводит к сокращению площади морского льда и уменьшению амплитуды его сезонных колебаний, что, однако, способствует увеличению продолжительности навигационного периода на Северном морском пути в долгосрочной перспективе.

В настоящей работе были проанализированы данные совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана Института вычислительной математики РАН с пространственным разрешением 4х50, модели WRF-ARW с пространственным разрешением 30х30км, а также данные Арктического реанализа. Область расчета – Арктика (юг Северного полярного круга и северней). Произведено сравнение модельных приземных характеристик (температура, скорость ветра, влажность, давление) с рядом данными наблюдений с метеостанций из области расчета (общее число станций – 645) за 2000-2010 года.

Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария на фоне многолетних колебаний

Кононова Н.К.

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

NinaKononova@yandex.ru

Ключевые слова: циркуляция атмосферы, северное полушарие, элементарный циркуляционный механизм

В 2019 г. резко возросла продолжительность меридиональных северных процессов [1] в Северном полушарии: на 45 дней по сравнению с 2018 г. и составила 230 дней (табл. 1).

Таблица 1

Группы	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль
Зональная	0	0	3	0	0	0	0
Нарушение зональности	2	2	2	0	0	1	2
Меридиональная северная	25	2	10	30	31	15	18
Меридиональная южная	4	19	16	0	0	14	10
Группы	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год	
Зональная	0	0	0	0	0	4	
Нарушение зональности	0	2	0	2	0	13	
Меридиональная северная	14	21	15	16	28	230	
Меридиональная южная	17	7	16	12	3	118	

В апреле и мае целых два месяца отмечались только меридиональные северные (блокирующие) процессы [2], в связи с чем во многих регионах стал наблюдаться дефицит осадков. В антициклонической циркуляции при безоблачном небе стала быстро повышаться температура воздуха [4]. Только в Сибирском секторе за апрель-май был перекрыт 81 абсолютный максимум температуры воздуха. Якутия стала регионом рекордного тепла. В поселках под Новосибирском в ночь на 5 апреля из-за очень тёплой весны началось наводнение. Снег таял очень быстро, а воде некуда было уходить. Неблагоприятная паводковая ситуация сложилась в Советском, Первомайском и Кировском районах. В Бурятии 15 апреля поднялась пыльная буря. Осадков перед этим за 2 недели выпало менее 1 мм, а скорость ветра достигала 25 м/с. Из-за этого в первой половине апреля в ряде районов Забайкалья сложилась чрезвычайная пожарная опасность. 17 апреля природные пожары подошли к границе с Китаем. К началу мая отсутствие осадков и порывистый ветер усугубили пожарную опасность. К 18 мая пожары начались уже на Дальнем Востоке.

В нижней тропосфере в последние годы в основном чередуются северные и южные меридиональные потоки [4], что приводит к усилению межширотного обмена воздушных масс, а это ведёт к частой смене погоды, обострению атмосферных фронтов и к росту повторяемости опасных природных процессов, что и показал 2019 г.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Института географии РАН, проект № 0148-2019-0009.

Литература:

1. Дзердзеевский Б.Л. Избранные труды. Общая циркуляция атмосферы и климат. Москва, "Наука", 1975, 288 с.
2. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в 1899-2019 гг. [Электронный ресурс] URL www.atmospheric-circulation.ru
3. Кононова Н.К. Изменения глобальной циркуляции атмосферы в период 1899-2018 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология, 2019, № 4, с. 111-129
4. Новости погоды [Электронный ресурс] URL Meteonovosti.ru

Тропопауза как поверхность раздела меридианальных потоков в глобальной циркуляции атмосферы раздела воздушных масс

Кочин А.В.

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

amarl@mail.ru

Ключевые слова: *глобальной циркуляции воздуха, высота тропопаузы, полярная тропопауза, тропическая тропопауза*

Существующее объяснение образования тропопаузы за счет радиационных эффектов нельзя признать завершенным, так как не объясняют наблюдаемые в тропопаузе изменения направления ветра, а также резкие знакопеременные градиенты вертикального профиля температуры. Высота тропопаузы над поверхностью Земли изменяется в небольших пределах, в то время как радиационные процессы обладают значительной изменчивостью. Полярная тропопауза разделяет атмосферу на две принципиально различные области, отличающиеся как по химическому составу, так и по термодинамическим параметрам. Существование тропической тропопаузы, расположенной над полярной, еще более усложняет ситуацию. Все это свидетельствует, что происхождение тропопаузы связано с явлениями глобального масштаба. В работе предлагается объяснение возникновения тропопаузы в результате глобальной циркуляции воздуха в атмосфере Земли. В рассматриваемой модели тропопауза является поверхностью раздела меридианальных потоков воздуха. Понимание механизма образования тропопаузы может существенно улучшить как и прогноз погоды различной заблаговременности, так и достоверность результатов климатических моделей, потому что ее высота определяет интенсивность тепло- массообменных процессов в атмосфере, а также оптическую массу атмосферы и, соответственно, радиационный баланс.

Переход терминатором звукового барьера как причина формирования ячейки Фаррела и «ревущих сороковых»

Кочин А.В.

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

amarl@mail.ru

Ключевые слова: *терминатор, скорость звука, малые возмущения давления, ячейка Фаррела, ревущие сороковые*

Скорость смещения терминатора (терминатор-это разделительная линия между освещенной и неосвещенной частями небесного тела) относительно поверхности Земли увеличивается в направлении экватора и на широте 45 градусов в обоих полушариях становится равной скорости звука. Смещение терминатора вызывает малые возмущения давления в атмосфере. Скорость распространения возмущений равна скорости звука, поэтому они обгоняют терминатор на широтах больше 45 градусов и отстают от него на более низких широтах. На широте 45 градусов терминатор и возмущения движутся как единое целое. Рассматривается образование области повышенного давления с центром на широте 45 градусов из-за синхронного движения терминатора и малых возмущений, которое вызывает упорядоченное меридиональное движение и постоянный западный перенос. Меридиональное движение вызывает появление ячейки Фаррела с центром на 45 градусах. Волна сжатия из области высокого давления не может обогнать терминатор, поэтому она распространяется только в западном направлении и генерирует «ревущие сороковые» на широте около 45 градусов. Ячейка Фаррела и «ревущие сороковые» являются важной частью глобальной циркуляции атмосферы, поэтому понимание процессов их формирования поможет увеличить продолжительность надежного прогнозирования погоды и важно для климатических исследований.

Численное моделирование разложения метангидратов, сформировавшихся в многолетнемерзлых породах

Малахова В.В.

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новоси-
бирск, Россия*

malax@sscc.ru

Ключевые слова: Арктический шельф, подводная мерзлота, гидраты метана, зона стабильности гидратов, ледниковые циклы

Многолетняя мерзлота распространена в Арктическом регионе, как в континентальной области, так и на обширных территориях мелководного шельфа арктических морей. Большое количество газа, в основном метана, может находиться в многолетнемерзлых породах в гидратной форме. Метангидраты формируются и существуют внутри зоны стабильности в течение длительного времени. В области распространения подводной многолетней мерзлоты область стабильности метангидратов начинается с глубин 120 - 250 м [1]. Однако при дополнительном промерзании пород, которое происходило в ледниковые периоды, условия для формирования гидратов выполнялись на меньших глубинах, порядка нескольких десятков метров. Покровное оледенение прибрежных равнин также способствовало гидратообразованию в неглубоких мерзлых породах [2]. В дальнейшем часть газовых гидратов могла сохраниться за счет проявления эффекта самоконсервации при отрицательных температурах пород. Существование метангидратов в верхних слоях мерзлых толщ в неравновесных условиях считается одной из возможных причин постоянных газопроявлений при эксплуатации скважин на газовых месторождениях Ямала, а также представляет опасность при освоении недр.

В данной работе исследуется состояние газогидратной залежи, образованной в многолетнемерзлых породах неглубокого залегания и в дальнейшем оказавшейся в неравновесных условиях. В исследовании используется подход, при котором определяются условия устойчивости гидрата метана, и, в случае их нарушения, рассчитывается разрушение газогидратной залежи с учетом потребления тепла. При моделировании изменения гидратонасыщенности мерзлых пород используется метод расчета, основанный на предположении, что преобразование скоплений свободного газа является вероятным механизмом образования гидрата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 20-11-20112).

Литература:

1. Malakhova V. V. Estimation of the subsea permafrost thickness in the arctic shelf // Proceedings of SPIE. 2018. V.10833. P. 108337T.
2. Аржанов М. М., Малахова В. В., Мохов И. И. Условия формирования и диссоциации метангидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчетам // Доклады АН. 2018. Т. 480. №6. С.725-729.

**Исследование пространственно-временных особенностей
поведения характеристик неустойчивости тропосферы и нижних
слоев стратосферы их реакции к возмущениям поверхности**

Мартынова Ю.В.², Гочаков А.В.³, Крупчатников В.Н.¹

¹*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новоси-
бирск, Россия*

²*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

³*Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт Рос-
гидромета, Новосибирск, Россия*
vkрупчатnikov@yandex.ru

Ключевые слова: *стратосферный полярный вихрь, волновая активность, блокинг, бароклин-
ная неустойчивость*

В докладе представлены некоторые результаты по исследованию тропосферного влияния, через распространяющиеся волны Россби, на стратосферный полярный вихрь и обрушение волн Россби в стратосфере, которое связано с формированием блокинга, а также особенности поведения характеристик неустойчивости тропосферы и нижних слоев стратосферы.

В частности, был проведен анализ волновой активности для осенне-зимних сезонов, характеризующихся особенностями формирования снежного покрова в Сибири. На основании критериев интенсивности формирования снежного покрова были сформированы два композита, для которых были рассмотрены потоки Элиассена-Пальма, рассчитанные на основе данных реанализа. Для различных уровней тропосферы и нижней стратосферы была проведена оценка бароклиной неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке РФФ №19-17-0248.

Особенности региональных изменений площади морского льда в Арктике

Матвеева Т.А.^{1,2}, Семенов В.А.^{1,2}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

matania.777@gmail.com

Ключевые слова: арктические морские льды, климат Арктики, арктические моря

Одно из самых ярких проявлений происходящих изменений климата – стремительное сокращение площади морских льдов (ПМЛ) в Арктике в последние десятилетия. Изменения ПМЛ имеют значительные региональные особенности (Onarheim et al., 2012; Матвеева и др., 2020), а также разную скорость изменений в период непрерывного спутникового зондирования (Stroeve et al., 2012). На исследование пространственно-временных особенностей и направлена данная работа. Рассмотрен период 1979-2019, который поделён на более короткие периоды – 1979-1999 и 2000-2019. В период 1979-2019 наибольший тренд общей площади льда в Арктике был отмечен в сентябре и октябре, но в течение года вклад в общий тренд вносят изменения в разных морях. В работе показано, из чего складывался общеарктический тренд ПМЛ для каждого месяца года. В зимние и весенние месяцы основной вклад в тренд вносило Баренцево море (около 50%). В августе-сентябре большая часть тренда приходилось на Центральную Арктику южнее 80°с.ш. (более 50%) и на Восточно-Сибирское, Карское моря. В октябре вклад в тренд сокращения ПМЛ вносят Центральная Арктика южнее 80°с.ш., а также Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское моря.

Изменение ПМЛ в период 1979-2019 происходило не равномерно. В последние два десятилетия скорость сокращения ПМЛ значительно возросла, особенно в сентябре-октябре. В зимние месяцы и поздней осенью основные изменения трендов в период 2000-2019 по сравнению с 1979-1999 отмечены в Баренцевом, Баффина, Гренландском морях. В летние месяцы и ранней осенью тренды сокращения льда возрастают в последние 20 лет в Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском морях, в Центральной Арктике.

В период последних 20 лет увеличилась также амплитуда сезонного ПМЛ по сравнению с 1979-1999. Наибольшие изменения амплитуды сезонного хода произошли в период 2000-2019 в Центральной Арктике южнее 80°с.ш. – в летний период площадь покрытия льдом сократилась почти вдвое. В зимний период наибольшие изменения площади покрытия льдом произошли в Баренцевом море – сокращение площади покрытия моря льдом составило 15-20% в последние десятилетия по сравнению с периодом 1979-1999.

Работа выполнена при поддержке ГЗ ИГ РАН и проекта РФФИ-Арктика (№ 18-05-60216).

Литература:

1. Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С. Ледовитость арктических морей и её связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // Лёд и Снег. – 2020. – Т. 60(1). – С. 134-148.
2. Onarheim I.H., et al. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // Journal of Climate. – 2018. – V. 31(12). – P. 4917-4932.
3. Stroeve J. C., et al. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // Climatic change. – 2012. – V. 110(3-4). – P. 1005-1027.

О возможности прогнозирования климатических изменений на основе учета обратных связей

Морозова С.В.¹, Полянская Е.А.¹, Кононова Н.К.^{2,3}

¹*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н.Г.Чернышевского, Саратов, Россия*

²*Институт географии РАН, Россия, Москва*

³*Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
swetwl@yandex.ru*

Ключевые слова: климатические изменения, общая циркуляция атмосферы, обратные связи

На основе динамики планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) в различные естественные климатические периоды состояния земной климатической системы [1,2] выявлена отрицательная обратная связь между ростом средней приповерхностной температуры воздуха Северного полушария и состоянием этого глобального объекта циркуляции. Рассматривались две характеристики ПВФЗ – площадь и интенсивность. Под площадью ПВФЗ понималась часть околополюсного пространства, ограниченная осевой линией ПВФЗ с юга. За интенсивность ПВФЗ принималась скорость геострофического ветра в ее срединном течении.

Расчет этих характеристик ПВФЗ в период стабилизации и во вторую волну глобального потепления позволил установить, что при росте средней полушарной температуры происходит ослабление интенсивности ПВФЗ и расширение ее площади. Отметим, что выявленное климатическое изменение интенсивности ПВФЗ аналогично ее сезонной динамике. В то же время климатическое изменение ее площади противоположно сезонным колебаниям этой характеристики. Продвижение ПВФЗ к югу предполагает расширение зоны отрицательных температур, что способствует снижению общего температурного фона. Данный вывод не противоречит роли ОЦА в климатообразующих процессах – сглаживание температурных контрастов между полюсом и экватором.

Выявленная обратная связь (рис. 1) позволила сформулировать климатически значимый вывод: при переходе от холодного климатического периода к тепловому снижается интенсивность атмосферной циркуляции при одновременном продвижении самой ПВФЗ к югу. Аналогично при переходе от теплого климатического периода к холодному интенсивность ПВФЗ возрастает, а ее площадь сокращается. Применение указанного положения к различным фазам второй волны глобального потепления позволило спрогнозировать наступление непродолжительного периода относительно ровных температур, аналогичному периоду стабилизации, только на новом, более высоком температурном фоне (рис. 2). Считаем, что с помощью описанного подхода возможна детализация результатов гидродинамических расчетов будущей климатической изменчивости.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Института географии РАН, проект №. 0148-2019-0009 и в рамках НИР ФИЦ Ин-БЮМ (регистрационный номер: АААА-А19-119061-190081-9).

Литература:

1. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов, изд-во СГУ. 2019. 132 с.
2. Morozova SV, Polyanskaya EA, Ivanova GF, Levitskaya NG, Denisov KE, Molchanova NP Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). Volume 107. 2018.

Особенности изменений протяженности снежного покрова и морских льдов в связи с температурными изменениями в Северном и Южном полушариях в последние десятилетия

Мохов И.И.^{1,2}, Парфенова М.Р.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

mokhov@ifaran.ru

Ключевые слова: Арктика, Антарктика, морской лёд, снежный покров, полушарная температура, корреляционный анализ, кросс-вейвлетная когерентность, изменение климата

Представлены результаты анализа особенности изменений протяженности снежного покрова и морских льдов в связи с температурными изменениями в Северном и Южном полушариях по данным для последних десятилетий с использованием многолетних данных NSIDC (<https://www.ncdc.noaa.gov/snow-and-ice/extent/>) и GSL (<https://climate.rutgers.edu/snowcover/>), а также данных реанализа ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) со среднемесячным осреднением.

Получены количественные оценки связи межгодовой изменчивости антарктических и арктических морских льдов с изменениями приповерхностной температуры в Северном и Южном полушариях по спутниковым и наземным данным и данным реанализа для последних четырех десятилетий (1980-2019 гг.). Отмеченное ранее общее увеличение протяженности антарктических морских льдов (до 2016 г.) по спутниковым данным, доступным только с конца 1970х гг., на фоне глобального потепления и быстрого уменьшения протяженности морских льдов в Арктике связано с региональным проявлением естественных колебаний климата с периодами до нескольких десятилетий. Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют о значимой когерентности и отрицательной корреляции с полушарной приповерхностной температурой в последние десятилетия протяженности не только арктических, но и антарктических морских льдов.

Отмечены сезонные и региональные особенности чувствительности снежного покрова к изменению температурного режима в Северном полушарии с оценкой изменений в последние десятилетия. Представлены особенности изменчивости снежного покрова в Евразии и Северной Америке. Отмечены, частности, особенности изменений снежного покрова в осенние сезоны.

Влияние прямого эффекта аэрозолей на метеорологический режим Северной Евразии

Полухов А.А.^{1,2}, Блинов Д.В.², Чубарова Н.Е.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

aeromsu@gmail.com

Ключевые слова: аэрозоль, прямой эффект аэрозолей, аэрозольные климатологии, прогноз температуры, COSMO-Ru

В докладе рассматриваются современные аэрозольные климатологии и их влияние на точность прогноза погоды. Проведены модельные эксперименты с использованием модели COSMO-Ru с климатологиями Tanre, Tegen, MACv2 и CAMS для центральных месяцев сезона для территории Евразии для 2017 года. Произведена оценка точности прогноза приземной температуры воздуха. Также в докладе представлены результаты сравнений модельных расчетов суммарной радиации с данными измерений в обсерваториях МГУ и Тикси (Россия), обсерватории Эйлат (Израиль) и обсерватории Линденберг (Германия). Показано, что при использовании климатологий аэрозолей отклонение расчетов от данных измерений не превышает 25 Вт/м².

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90129

Исследование синоптических процессов на юго-востоке Русской равнины в различные климатические периоды

Полянская Е.А.¹, Морозова С.В.¹, Кононова Н.К.^{2,3}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского, Саратов, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия
swetwl@vandex.ru

Ключевые слова: синоптический процесс, циркуляция атмосферы, климатические периоды, земная климатическая система

Следствием наблюдаемых климатических изменений является возрастание погодно-климатической неустойчивости, которая является результатом развивающихся над регионом синоптических процессов. Авторами поставлена задача сравнить повторяемость различных типов синоптических процессов на юго-востоке Русской равнины в два климатических периода – период стабилизации и вторую волну глобального потепления, выделенных в работе [1]. Типы синоптических процессов определялись в соответствии с региональной типизацией В.Л. Архангельского - Е.А. Полянской [2,3].

Сравнение проводилось отдельно для летнего и зимнего сезонов. Получено, что зимой при переходе от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления произошло уменьшение повторяемости циклонической деятельности на полярном фронте и числа случаев воздействия субтропических антициклонов. Во вторую волну глобального потепления чаще отмечаются малоградиентные и деформационные поля по сравнению с периодом стабилизации.

Некоторые тенденции развития синоптических процессов от одного исследуемого климатического периода к другому сохраняются и в летние месяцы. Так над регионом в период стабилизации чаще проходили полярнофронтальные циклоны, чаще воздействовал отрог субтропического максимума давления. Однако, в период стабилизации в регионе реже наблюдались малоградиентные и деформационные поля, чем во вторую волну глобального потепления. За летний сезон в два климатических периода повторяемость деформационных полей не изменилось.

Отметим еще одну интересную особенность развития синоптических процессов над регионом летом. Если в период стабилизации основным погодоопределяющим процессом на юго-востоке Русской равнины была циклоническая деятельность на полярном фронте, то во вторую волну глобального потепления общий температурный фон региона формировался под преимущественным воздействием арктических антициклонов. Летняя трансформация воздуха в них способствует более частому возникновению в регионе интенсивных засух. Такое развитие синоптических процессов в различные климатические периоды может послужить объяснением подмеченной закономерности, что в последние десятилетия растет не столько частота засух, сколько их интенсивность.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Института географии РАН, проект №. 0148-2019-0009 и в рамках НИР ФИЦ ИБ-БЮМ (регистрационный номер: АААА-А19-119061-190081-9).

Литература:

1. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та.- 2019.- 132 с.
2. Архангельский В.Л. Региональная синоптика Нижнего Поволжья. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1968. - 208 с.
3. Полянская Е.А. Синоптические процессы и явления погоды в Нижнем Поволжье. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1986. - 208 с.

Влияние прохождения холодного фронта через Мозамбикский пролив на начало Индийского муссона по данным реанализов и высокоразрешающего моделирования

Разоренова О.А., Гавриков А.Н.

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия
olgar@sail.msk.ru*

Ключевые слова: *Индийский муссон, холодный фронт, реанализ, высокоразрешающее моделирование*

Современные глобальные атмосферные реанализы, а также развитие иерархий моделей высокого разрешения дают возможность объективного исследования процессов мезомасштаба и позволяют определить и проверить механизмы взаимодействия процессов в земной климатической системе, которые до последнего времени могли быть исследованы только путем визуального синоптического анализа.

В представленной работе исследовано влияние прохождения холодного фронта через Мозамбикский пролив на начало Индийского муссона с использованием данных современного высокоразрешающего реанализа ERA5. Этот реанализ открывает новые возможности в исследовании циркуляций малого масштаба, что особенно важно для тропического и экваториального региона. Для корректного расчета вертикальной скорости, которая играет ключевую роль во многих типах мезомасштабных движений, дополнительно проводились численные эксперименты с использованием высокоразрешающей негидростатической модели WRF.

Задача заблаговременного прогноза начала и интенсивности Индийского муссона остается актуальной и в настоящее время. Многочисленные работы посвящены исследованию влияния атмосферных процессов Южного полушария на развитие Индийского муссона: его начало, скорость продвижения, формирование и продолжительность его фаз. В частности, рядом исследователей отмечено усиление сомалийского струйного течения в нижней тропосфере при прохождении холодного фронта через Мозамбикский пролив, что приводило к интенсификации юго-западного муссонного потока и влияло на начало муссона над штатом Керала. Однако недостаточность данных не позволяла досконально изучить этот вопрос и определить статистическую значимость предложенного механизма. В настоящей работе проверен и подтвержден обнаруженный механизм: прохождение холодного фронта через «критическую точку» (30° ю.ш. - 40° в.д.), с одной стороны, усиливает муссонный поток, с другой стороны, ячейка высокого давления в тылу фронта вливается в Маскаренский антициклон, усиливает его, что также способствует увеличению интенсивности юго-восточного пассата. Для анализа был выбран период с 2001 по 2010 гг. Классическая схема этого механизма представлена для 2009 г. Кроме того, обнаружено, что последующие фронты способствовали более быстрому продвижению муссона и усилению юго-западного ветра над Индией. Проведенный численный эксперимент с меняющимися граничными условиями также подтвердил наличие и значимость выявленного механизма.

Литература:

1. Разоренова О.А. Индийский муссон как взаимодействие атмосферных процессов Северного и Южного полушарий. Диссертация на соискание ученой степени канд. геогр. наук. Москва, 1989, 211 стр.
2. Skamarock, W. C. et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note. Boulder, Colorado: NCAR. 2008.

Диагностика динамики стратосферы на основе гетеродинной инфракрасной спектроскопии сверхвысокого разрешения

Родин А.В.^{1,2}, Зеневич С.Г.¹, Чурбанов Д.В.¹, Газизов И.Ш.¹, Спиридонов М.В.^{1,3}

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Институт общей физики РАН им. А.М.Прохорова, Москва, Россия

alexander.rodin@phystech.edu

Ключевые слова: спектр, гетеродинный, лазер, эффект Доплера

Предложен новый метод прямого дистанционного измерения скорости воздушных потоков в атмосфере на основе анализа доплеровского искажения контура спектральной линии молекулярного поглощения. С помощью прямых наблюдений Солнца методом гетеродинной спектроскопии достигнуто рекордное спектральное разрешение $\lambda / \delta\lambda \sim 10^8$ в ближней инфракрасной области спектра. Полностью разрешенный контур спектральной линии CO_2 в полосе 1,58 мкм содержит информацию не только о скорости ветра, но и о высотах, на которых формируются различные участки контура, что позволяет решить обратную задачу восстановления профиля скорости от поверхности до нижней мезосферы. Весовые функции показывают, что вертикальное разрешение профиля составляет 2-3 км у поверхности и около шкалы высоты в верхней части профиля. Сравнение восстановленных профилей с результатами реанализа показывает, что метод надежно фиксирует положение впадины и стратосферных струйных течений, однако может приводить к существенным ошибкам в случае сложной структуры профиля ветра. В качестве дополнительного информационного продукта метод дает вертикальный профиль двуокиси углерода, также может использоваться для мониторинга содержания метана в атмосфере и паров воды в стратосфере. В ближайшей перспективе планируется проведение кампании по систематическому мониторингу структуры полярного вихря и содержания парниковых газов в российской Арктике, а также реализация метода на борту космического аппарата в режиме солнечных затмений.

**Предварительные результаты анализа данных мониторинга
температуры воздуха, проведенного в Центре геофизического
мониторинга г. Москвы ИДГ РАН и на Геофизической
обсерватории Михнево ИДГ РАН**

Рябова С.А.

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия
riabovasa@mail.ru

Ключевые слова: *сельская местность, городская местность, температура воздуха, сезонная вариация, суточная вариация*

Быстрый рост и развитие инфраструктуры больших городов приводят к необходимости углубленного изучения процессов в городской атмосфере для выявления и оценки антропогенного вклада в формирование особого метеорологического режима в городе. Одним из ярких примеров антропогенного влияния на климат города может служить более высокая температура воздуха в городе по сравнению с окружающей территорией и образование так называемого городского «острова тепла». В докладе представлены результаты анализа временных вариаций температуры, зарегистрированных приблизительно в центре Москвы (Центр геофизического мониторинга г. Москвы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Ленинский проспект), крупнейшего города (по площади) на европейском континенте, и в 85 км к югу от Москвы в сельской местности (Геофизическая обсерватория «Михнево» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Московская область, поселок Михнево). В ходе обработки и анализа результатов регистрации температуры воздуха метеостанцией Davis Vantage Pro2 устанавливаются сезонные и суточные вариации температуры воздуха на обоих участках. Полученные данные показывают разницу между временными вариациями температуры в Москве (городская местность) и на обсерватории «Михнево» (сельская местность).

Влияние потепления климата и лесных пожаров на изменения растительности в бассейне озера Байкал

Сафронов А.Н.

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Институт океанологии им. П.П.Ширинова РАН, Москва, Россия

safonov@ifaran.ru

Ключевые слова: водосбор о. Байкал, MCD12C1, изменение растительности, изменение климата, лесные пожары

На основе анализа спутниковых данных MCD12C1 была исследована динамика изменения растительности на территории российской части водного бассейна озера Байкал за период 2010 – 2018. Было установлено, что уменьшение площади болотных систем началось в 2012 году и продолжалось до 2015 года. После этого болотные системы частично восстановились во время сезона сильных дождей в 2018 году. В исследуемом регионе в период 2010–2018, общая площадь, покрытая лесами, не превышала 20.3% от площади региона. Убыль лесов началась в 2013 году и продолжалась до конца рассматриваемого временного интервала. За 2013–2018 годы площадь лесов сократилась на 12.1% в пересчете на площадь, занятую лесами в 2013 году. Анализ летних осадков и индексов засушливости проводился с использованием климатических наборов данных CRU TS и GPCC. Показано, что межгодовые колебания осадков и изменения индекса засушливости определяются изменчивостью глобальной циркуляции влажных воздушных масс. Для исследования влияния лесных пожаров на динамику изменения растительности были использованы такие продукты MODIS, как MCD64A1 (площадь, пораженная огнем) и MCD14ML (распределение очагов пожаров). Пространственные распределения очагов пожаров и выжженных территорий в целом соответствуют зонам засушливости, но это не может объяснить 20-кратное увеличение количества лесных пожаров в июле 2015 года. Отмечено, что большинство горячих точек расположено вдали от населенных пунктов, дорог и лесозаготовок, в труднодоступных горных районах, а также в малонаселенных районах. Мы предполагаем, что причиной таких возгораний могут быть сухие грозы (dry thunderstorms), или аэрозольные молнии (pyrocumulus lightning), или дистанционное воздействие.

Палеоклимат и массовые вымирания

Сафронов А.Н.

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия*

safronov@ifaran.ru

Ключевые слова: *размер планеты, Галактика Млечного Пути, природный ядерный реактор, палеоклимат, массовые вымирания, уровень моря, Юрский период, окаменелости*

В работе были исследованы причины массового вымирания в Юрском периоде. Было показано, что сжатие галактики приводит к активации ядерного реактора Земли, что в свою очередь приводит к изменениям: структуры мантии и ядра, тектонической активности, уменьшению радиуса планеты, извержениям вулканов, изменению палеоклимата и дрейфу континентов. Также в результате разогрева планеты происходит образование крупных магматических провинций (Large Igneous Provinces, LIPs) и срединно-океанических хребтовых базальтов (Middle Ocean Ridge Basalts, MORBs). Процесс сжатия планеты сопровождается глобальными наводнениями и цунами, изменениями магнитных полей Земли и изменениями в распределении изотопов в осадочных породах. Было показано, что массовые вымирания произошли во время Всемирных наводнений, вызванных сужением земной коры в момент галактического гравитационного сжатия. Установлено, что среднее статистическое высотное распределение останков динозавров имеет бимодальное распределение и соответствует постоянным миграциям между равнинами и возвышенностями. Было высказано предположение, что скелеты динозавров хорошо сохранились в результате покрытия тел животных грязевыми потоками, которые образовались в результате распространения гигантских цунами. Была сформулирована рекомендация к палеонтологам, заключающаяся в обязательной регистрации высот фактического места нахождения найденных окаменелостей. Дано простое объяснение наличия границ в структуре Земли. Показано, что ядерный слой ^{40}K соответствует границе между верхней и нижней мантией; слой ^{137}Cs расположен на границе между нижней мантией и внешним ядром планеты; ядерный слой $\text{Th} - \text{U}$ является границей между внешним и внутренним ядром. Ранее абстрактные теории субдукции и дрейфа континентов приобрели ясный и очевидный физический смысл. Было показано, что стандартная геологическая таблица является регистрационной книгой галактических событий в период Палеозоя. Было высказано предложение о возможности восстановления по геологическим отложениям структуры галактических рукавов в области галактической тени, недоступной для наблюдения с Земли. Было предложено создать станции на возвышенных холмах для спасения и регенерации биологических форм в будущем.

Использование методов вейвлет-анализа в изучении климата арктического региона

Соловьев Д.А.¹, Нефедова Л.В.²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

solovev@ocean.ru

Ключевые слова: изменения климата, вейвлет-анализ, Арктика, аномалии температуры, САК

В настоящей работе дается оценка возможностей и преимуществ использования методов вейвлет-анализа в изучении климата Арктического региона на примере анализа индекса Североатлантического колебания и его связи с межгодовым ходом аномалии средней годовой температуры воздуха в Арктическом регионе.

В качестве исходной информации для оценки межгодового хода аномалии средней годовой температуры воздуха (АТВ) в Арктическом регионе (для широтной зоны 60—90° с.ш.) использовались значения температуры воздуха у поверхности Земли, синтезированные в NASA Goddard Institute of Space Science (NASA GISS) в рамках уникального проекта Berkeley Earth Surface Temperature (BEST). Указанные данные находятся в свободном доступе на сайте <http://berkeleyearth.org/data/>. В качестве базового периода осреднения для оценки аномалий температуры воздуха использовался период 1951—1980 гг., методология и алгоритмы обработки данных и контроля их качества на всех этапах описаны в работах [1].

С Североатлантическим колебанием (САК) связывают характер преобладающей погоды в Северной Америке, Гренландии и Европе [2]. Есть основания полагать, что Североатлантическое колебание оказывает влияние не только в пределах атлантического океана, но, являясь частью глобальной циркуляции, имеет связь с колебаниями климата всего Северного полушария.

Методами вейвлет-анализа выполнена оценка вклада различных слагаемых в генерацию энергии колебания и изменение его фазы. Показано, что во время положительной фазы колебания (теплая Арктика), отрицательная аномалия температуры имеет место в умеренных широтах Северной Атлантики. Эти аномалии сопровождаются положительным индексом САК. Это дает основание полагать, что в Северном Ледовитом океане генерация аномалий температуры происходит вследствие усиления адвекции атлантической воды [3]. Исследованы статистические характеристики межгодового хода сглаженных значений индекса САК и глобального вейвлет – спектра для индекса САК за период 01.1950 – 07.2020 и статистические характеристики межгодового хода аномалии среднегодовой температуры воздуха (АТВ), осредненной для широтной зоны 60-90° с.ш. и глобального вейвлет – спектра для АТВ за период 01.1950 – 07.2020 по данным архива BEST. Изменения в Североатлантическом колебании вызывают существенные изменения температуры воздуха у поверхности земли в Арктическом регионе, одновременно оказывая влияние на океанические течения и сопутствующие процессы переноса тепла. В положительной фазе САК усиливаются западные ветра вдоль Северной Атлантики, перемещая относительно теплый и сырой морской воздух вдоль большей части Европы и далее, через Азию, в то время как более сильные северные ветра несут холодный воздух вдоль Гренландии и северо-востока Канады на юг. При этом уменьшается температура воздуха и по северо-востоку Атлантики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (соглашение № 05.613.21.0090, проект RFMEFI61319X0090).

Литература:

1. Rohde R., Muller R., Jacobsen R., Perlmutter S., Rosenfeld A., Wurtele J., Curry J., Wickham C., Mosher S. Berkeley Earth Temperature Averaging Process // Geoinfor Geostat: An Overview. 2013. № 2(1). DOI:10.4172/gigs.1000103.
2. Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic climate system and its global influences - Overview of GRENE Arctic climate change research project (2011–2016) // Polar Science. 2020. С. 100548. DOI:10.1016/j.polar.2020.100548.

Численное моделирование локальных атмосферных процессов

Старченко А.В.^{1,2}, Барт А.А.^{1,2}, Кижнер Л.И.¹, Одинцов С.Л.^{2,1}, Данилкин Е.А.^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

starch@math.tsu.ru

Ключевые слова: метеорологическая мезомасштабная модель, схемы параметризации, турбулентность, атмосферный пограничный слой, остров тепла, интенсивные осадки

Представлены результаты численного моделирования параметров пограничного слоя атмосферы над ограниченной территорией сибирского региона, полученные за счет применения мезомасштабной метеорологической модели [1].

Мезомасштабная модель [1] прогнозирует составляющие скорости ветра и температурно-влажностные характеристики в пограничном слое атмосферы на 50 вертикальных уровнях для площади 200×200 с вложенной областью 50×50 км (шаг сетки 1 км с центром в городе Томск). Инициализация модели проводится на основе результатов численного прогноза по оперативной глобальной модели ПЛИАВ [2] Гидрометцентра РФ. Основные структурные особенности модели [1]:

- негидростатическое квазисжимаемое приближение для уравнений движения;
- координатная система с переменным вертикальным разрешением, следящая за рельефом поверхности;
- боковые граничные условия «радиационного» типа (для компонент горизонтальной скорости, температуры и влажности), учитывающие пространственные и временные тенденции зависимых переменных, генерируемых моделью большего масштаба (оперативной глобальной моделью ПЛИАВ [2] Гидрометцентра РФ);
- прогностическая модель для температуры почвы, которая опирается на уравнение теплопроводности;
- приповерхностные турбулентные потоки импульса, тепла и влажности, рассчитываемые на основе теории подобия Монина-Обухова;
- коротковолновая и длинноволновая радиация, учитывающая эффекты слоя облачности;
- микрофизика влаги, рассматривающая образование облачности, дождя, снега, ледяных кристаллов, крупы/града.

С помощью разрабатываемой модели проведены исследование характеристик городского «острова тепла» и анализ успешности прогнозирования выпадения осадков для условий сибирского региона.

Результаты расчетов сравниваются с наблюдениями параметров атмосферного пограничного слоя, получаемых с помощью метеорологических приборов ЦКП «Атмосфера» ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-20042).

Литература:

1. Starchenko A.V., Bart A.A., Bogoslovsky N.N., Danilkin E.A., Terentyeva M.V. A mathematical modelling of atmospheric processes above an industrial center // Proc. SPIE 2014. — Vol.9292. — P.929249-1-929249-30.
2. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза / М.А. Толстых, Р.Ю. Фадеев, А.В. Шляева и др. — Триада М, 2017. — 166 с.

Итоги десятилетней работы спутниковых радиометров ИКОР-М

Червяков М.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н.Г.Чернышевского, Саратов, Россия
chervyakovmu@mail.ru*

Ключевые слова: альbedo, солнечная радиация, ИКОР, радиометр

В работе рассматриваются результаты анализа пространственно-временного распределения альbedo, потоков отраженной и поглощенной солнечной радиации по данным двух российских гидрометеорологических спутников «Метеор-М» № 1 и № 2. На борту этих ИСЗ были установлены радиометры ИКОР-М, измеряющие потоки коротковолновой отражённой солнечной радиации, в диапазоне 0.3 – 4.0 мкм. Главным конструктором спутниковых измерителей являлся Складов Юрий Андреевич (1931-2014).

Одновременная работа двух радиометров в течение августа 2014 года, позволила найти для взаимосвязь их шкал. Таким образом, был получен почти 10-летний ряд наблюдений за составляющими радиационного баланса Земли. Это, пожалуй, самый длительный ряд спутниковых измерений в России.

Особенность радиометров и гелиосинхронность орбит спутников позволили построить карты всех измеряемых компонентов радиационного баланса Земли с временным разрешением в пределах одного месяца и менее. Пространственное разрешение среднемесячных величин отраженной коротковолновой радиации на верхней границе атмосферы составляет $2,5 \times 2,5^\circ$ дуги большого круга.

Анализ карт среднемесячных распределений величин альbedo на верхней границе атмосферы обнаруживает резкий контраст между значениями альbedo в высоких и средних широтах северного и южного полушарий. На основе полученных наблюдений изучены особенности широтных распределений альbedo над океаном и сушей, оценен вклад облачности в величину альbedo, рассмотрены среднегодовые и средне-сезонные вариации потоков отраженной и поглощенной солнечной радиации.

В работе также обобщаются результаты анализа распределений альbedo для различных районов Земли. Исследованы распределения альbedo над следующими районами: Гренландия, Амазонская низменность, Сахара, регион возникновения явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также регион с высокой муссонной активностью в Юго-Восточной Азии.

Литература:

1. Складов Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., Червяков М.Ю., Фейгин В.М. Измерения компонентов радиационного баланса Земли с ИСЗ "Метеор-М" № 1. Аппаратура ИКОР-М // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №2. С. 173-180
2. Червяков М. Ю., Спирихина А. А. Мониторинг событий Эль-Ниньо (Ла-Нинья) в Тихом океане по данным спутниковых радиометров ИКОР-М // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 35–41.

Высотные фронтальные зоны Северного полушария и роль потоков тепла от океана в их формировании

Разоренова О.А., Шабанов П.А.

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия

olgar@sail.msk.ru

Ключевые слова: высотные фронтальные зоны, корреляционный анализ, градиент геопотенциала, турбулентные потоки тепла от океана

Впервые проведено детальное исследование распределения высотных фронтальных зон (ВФЗ) в средней тропосфере для различных сезонов и выявлены межгодовые изменения в их положении и интенсивности. Объективная процедура определения ВФЗ включала в себя расчёт среднемесячных полей модуля горизонтального градиента геопотенциала по данным реанализа с помощью аппроксимации производных методом центральных разностей. Исходя из полученных полей градиентов геопотенциала, были выделены локальные максимумы и определено положение осевых линий высотных фронтальных зон. Были определены положения восьми ВФЗ: 1) Азиатско-тихоокеанская, 2) Североатлантическая, 3) Североамериканская, 4) Скандинавская, 5) Европейско-сибирская, 6) Восточноарктическая, 7) Гренландская, 8) Афро-южноазиатская. Сезонные изменения термического режима и барической топографии приводят к сезонному смещению ВФЗ и соответствующих им тропосферных фронтов, а также к их трансформации. Рассмотрено положение ВФЗ при преобладании меридиональных и зональных процессах. Показано, что высотные фронтальные зоны могут быть успешно использованы при диагнозе современных климатических колебаний над различными регионами земного шара. Рассчитанное семейство высотных фронтальных зон дает возможность исследовать отклик атмосферной циркуляции на сигналы Мирового океана. Пранализирована связь турбулентных потоков тепла из океана с полем пространственных градиентов геопотенциала в средней тропосфере в зимний период. Корреляционный анализ показал, что усиление потока тепла из океана в Северной Атлантике четко связано с усилением термобарических контрастов в средней тропосфере и, следовательно, способствует интенсификации североатлантической ветви ВФЗ. Анализ распределения коэффициентов корреляции показал, что значимая статистическая связь между океаническим потоком тепла и градиентами геопотенциала в средней тропосфере отмечается именно в областях формирования высотных фронтальных зон. Расчет канонических корреляций определил максимально связанные линейные структуры полей горизонтальных градиентов геопотенциала в средней тропосфере и полей потоков тепла от океана и позволил интерпретировать их с точки зрения развития различных режимов циркуляции.

Литература:

1. Погосян Х.П. Планетарные высотные фронтальные зоны в Северном и Южном полушариях. Л., Гидрометеиздат, 1955, 59 с.
2. Разоренова О.А. Климатология высотных фронтальных зон Северного полушария в зимний период. Метеорология и гидрология, 2016, № 1, с. 5–16.
3. Разоренова О.А. Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы в Северной Атлантике. I часть. Метеорология и гидрология. 1998. № 9. С.77–86 II часть. Метеорология и гидрология. 1998. № 10. С.69–80

Анализ обратных траекторий направлений прихода воздушных масс в Подмоскowie в 2017–2019 годах

Аникин П.П.¹, Исаков А.А.¹ Губанова Д.П.¹, Величко А.П.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

petr.anikin@gmail.com

Ключевые слова: обратные траектории, атмосферный аэрозоль

В докладе приводятся результаты анализа измерения характеристик приземного субмикронного аэрозоля на Звенигородской научной станции в 2017-2019 годах. Данные получены с помощью светодиодного поляризационного нефелометра ФАН. Вариации аэрозольных характеристик связаны, в основном, переносом воздушных масс, поэтому характер этих вариаций отражает крупномасштабные движения в атмосфере. В работах [1,2] мы, используя метод анализа обратных траекторий направлений прихода воздушных масс в Подмоскowie, применили его для совместного анализа с вариациями массовой концентрации приземного аэрозоля М на Звенигородской научной станции. Все возможные направления прихода воздушных масс были разбиты первоначально на восемь секторов, принадлежность к сектору определялась начальной точкой трехсуточной траектории и ее «закрученностью». При прохождении атмосферных фронтов, траектории проходили через разные географические регионы, возникла необходимость более тщательного исследования подобных ситуаций. Поэтому мы применили разбивку по двенадцати секторам, а для каждых суток считались четыре траектории с интервалом шесть часов. Данные по массовой концентрации М тоже проходили процедуру осреднения за 1 час при частоте съема 1 минута. Для трех лет 2017-2019 годов были получены гистограммы средних за год, число направлений прихода для каждого из двенадцати секторов и так же осредненные за год величины концентрации М. Общим для 2017-2018 годов явился ярко выраженный максимум на гистограммах в области северо-северо-западных направлений прихода, причем этому соответствуют минимумы средних величин М. Поведение гистограмм 2019г отличается. Сопоставление с данными о массовой концентрации приземных аэрозолей на ЗНС, полученными в тот же период времени в рамках ранее проведенных исследований подтверждают полученные результаты.

Литература:

1. Исаков А.А. О внутригодовой изменчивости массовой концентрации субмикронного приземного аэрозоля в Подмоскowie. // Оптика атмосферы и океана, 2010, Т23, №6, с 462-465.
2. Груздев А.Н., Исаков А.А., Аникин П.П. Многолетние тренды массовой концентрации приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32. – № 12. – С. 957–964.

Вариабельность распределения торона в приземном слое атмосферы над сушей средних широт

Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Афиногенов К.В., Гурьев А.В., Козьмина А.С.
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок, Россия
skeptikxxi@mail.ru

Ключевые слова: торон, атмосфера, приземный, наблюдения, моделирование

Естественные вариации объемной активности изотопов радона Rn^{222} и Rn^{220} (торон) в приземной атмосфере обусловлены прежде всего изменениями атмосферной стратификации и турбулентного режима [1]. В отличие от вариаций объемной активности атмосферного Rn^{222} вариации приземного торона изучены слабо. В то же время, благодаря малому времени жизни весь торон распадается в приземной атмосфере, внося в ее ионизацию вклад, сравнимый с вкладом Rn^{222} , даже при значительно меньшем потоке торона с земной поверхности [2].

Цель данной работы — получение оценок вариаций объемной активности приземного торона с помощью математической модели его распространения в приземной атмосфере с использованием результатов наземных аэрофизических и радонометрических наблюдений.

Проведены расчеты по модели, описывающей турбулентный транспорт торона в приземной атмосфере. В качестве граничного условия задавалась величина потока торона с земной поверхности, полученная по данным полевых натурных радонометрических наблюдений, проводимых на измерительном полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН [3]. Вариации параметров высотных профилей коэффициента турбулентной диффузии рассчитывались по данным полевых натурных наблюдений пульсаций скорости ветра на двух высотах, проводимых синхронно на том же измерительном полигоне. По результатам расчетов получены высотные профили объемной активности торона в атмосферном приземном слое, характерные для суши средних широт.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 16-17-10209).

Литература:

1. Anisimov S.V. et al. Variability of radon distribution in the atmospheric ... // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. DOI: 10.1088/1755-1315/231/1/012006.
2. Anisimov S.V. et al. Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // Boundary-Layer Meteorology. 2018. V. 167. P.327–348. DOI: 10.1007/s10546-017-0328-0.
3. Анисимов С.В. и др. Фоновая объемная активность радона и торона ... // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 4. С. 5–16. DOI: 10.21455/si2019.4-1.

Оценка эмиссий метана из наземных экосистем арктических регионов Западной Сибири

Аржанов М.М., Денисов С.Н.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

denisov@ifaran.ru

Ключевые слова: эмиссии метана, влажные экосистемы, воронки газового выброса

Сделаны оценки эмиссий метана в атмосферу из наземных экосистем, включая болота и озера, с учетом вклада потоков метана в результате разложения реликтовых метангидратов с использованием совместной модели тепло-влажнопереноса в грунте и метанового цикла [1].

Современные потоки метана из наземных экосистем п-ова Ямал, связанные с анаэробным разложением почвенной органики на увлажненных территориях составляют по расчетам с КМ ИФА РАН около $0.2 \text{ гCH}_4/\text{м}^2/\text{год}$ [1]. Суммарные выбросы CH_4 из влажных экосистем Ямала - около 0.02 Мт/год , что является незначительной величиной не только на глобальном ($\sim 160 \text{ Мт/год}$), но и на региональном уровне. Так по современным оценкам выбросы метана из влажных экосистем Западной Сибири находятся в пределах $2\text{-}10 \text{ МтCH}_4/\text{год}$ [2]

Изменения климата, наиболее значительные в высоких широтах Северного полушария приводят к повышению температуры мерзлых пород и влияют на стабильность реликтовых газогидратов (ГГ), залегающих в верхних горизонтах криолитозоны. Зафиксированные в 2014-2017 гг. на севере Западной Сибири воронки со следами выброшенной породы могли быть сформированы в результате газовых выбросов при диссоциации ГГ. В течение последующих 1.5-2 лет происходит затопление воронок. Небольшие озера размером несколько сотен метров составляют 97% от общего числа озер региона. При этом часть озер, которые считались термокарстовыми, могли быть образованы в результате затопления воронок газовых выбросов. Поток метана в атмосферу в результате газовых выбросов из воронок, обнаруженных на п-ве Ямал, оцененный на основе [3], составляет $200 \text{ тCH}_4/\text{год}$.

Следует отметить, что данная оценка является оценкой снизу, поскольку за период наблюдений с 2014 г. в одной из воронок наблюдался повторный выброс газа. Также газовые выбросы фиксировались в ряде озер региона.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00087, 18-05-60111, 19-05-00409.

Литература:

1. Денисов С. Н. и др. Модельные оценки глобальных и региональных эмиссий метана влажными экосистемами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. N. 5. С. 543-549.
2. Bohn T. et al. WETCHIMP-WSL: intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia // Biogeosciences. 2015. N.12. P. 3321-3349.
3. Федосеев С.М. Реликтовые газовые гидраты как возможный источник загазованности подземных горных выработок криолитозоны // Наука и образование. 2014. N. 1. С. 40-45.

Экспериментальные исследования аэрозоля в юго-восточном Крыму в 2018–2020 годах

Артамонова М.С.¹, Чхетиани О.Г.¹, Лапченко В.А.², Максименков Л.О.¹, Иорданский М.А.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского-природный заповедник РАН- филиал Ин-ститута биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Феодосия, Россия

³ЗАО "НИФХИ им. Л.Я.Карпова", ГК "Росатом", Москва, Россия

artamonova@ifaran.ru

Ключевые слова: аэрозоль, микрофизические параметры, элементный состав, юго-восточный Крым

На Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского в юго - восточном Крыму регулярные круглосуточные измерения микрофизических параметров аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы проводятся с сентября 2018 г. Было выполнено два наблюдательных цикла: сентябрь 2018 г. - июнь 2019 г, март - июнь 2020 г.

Микрофизические характеристики аэрозоля измерялись при помощи спектрометров - лазерного аэрозольного ЛАС-П и оптико-электрического ОЭАС (разработчик приборов - НИФХИ им. Л.Я.Карпова), предназначенных для определения счетной концентрации и дисперсного состава аэрозольных частиц с диаметром 0,15 -5,0 мкм.

Массовая концентрация аэрозольных частиц для PM₅ составляла от 5 до 80 мкг/м³ для первого цикла наблюдений. В весенний период наблюдений 2020 г. наблюдались повышенные значения концентрации мелкодисперсного аэрозоля, относительно значений, зарегистрированных в 2019 г. Так в апреле 2020 г. зафиксированы локальные повышения значения концентрации PM₁ до 40 мкг/м³, а в 2019 г. только до 20 мкг/м³. На основании анализа обратных траекторий в рамках модели HYSPLIT, эти повышения связаны по всей видимости с приходом воздушных масс, которые перемещались к месту наблюдений с северо-северозапада, проходя через близ лежащие промышленные районы.

Для определения химического состава приземного аэрозоля было отобрано 15 проб воздуха в первый цикл наблюдений и 90 проб во второй. Анализ элементного состава аэрозольных частиц, содержащихся в пробах на фильтрах АФА ХА -20, осуществлялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Отмечено, что в аэрозольных пробах первого периода измерений, связанных с приходом воздушных масс с северо-западного направления, обнаружено повышенное содержание элементов - селена, серы и тяжелых металлов - висмута, кадмия, свинца, молибдена, сурьмы, что также подтверждает перенос техногенного аэрозоля из промышленных районов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-50110.

Модельные расчеты концентраций PM₁₀ XTM CHIMERE с горизонтальным шагом 2 км в московском регионе

Борисов Д.В.¹, Кузнецова И.Н.¹, Шалыгина И.Ю.¹, Нахаев М.Н.¹, Лезина Е.А.²

¹*Гидрометцентр России, Москва, Россия*

²*ГПБУ "Мосэкомониторинг"*

lbj23.98@mail.ru

Ключевые слова: химическая транспортная модель, эмиссии, прогноз, эпизоды ослабления турбулентного перемешивания

Концентрация PM₁₀ является важнейшей характеристикой при оценке качества воздуха [1]. Вариабельность концентраций PM₁₀ в основном определяется процессами турбулентного перемешивания и крупномасштабным переносом. На фоне в целом незначительной изменчивости временами формируются эпизоды высокого содержания PM₁₀ в приземном воздухе, прогнозирование которых является главной задачей оперативной технологии численных расчетов качества воздуха. В Гидрометцентре России прогноз концентраций PM₁₀ в воздухе Москвы осуществляется на основе химической транспортной модели XTM CHIMERE с использованием данных зарубежной базы EMEP (<https://www.emep.int/>), в которой количественное и отраслевое распределение эмиссий производится по текущему «европейскому» стандарту [2]. По результатам нашего анализа обнаружено необоснованное для московского региона увеличение на 22-26% выбросов PM_{2.5} и PM_{coarse} от SNAP4 (производственные процессы) с 2008 по 2013 год. Выполнена серия экспериментальных расчетов по оптимизации препроцессинга эмиссий, позволившая приблизить модельные расчеты PM₁₀ к измеряемым концентрациям на станциях городского типа сети «Мосэкомониторинг» при одновременном сглаживании прогностического поля PM₁₀ в регионе. По результатам верификации модельных расчетов XTM CHIMERE средних суточных концентраций PM₁₀ в период февраль – октябрь 2019 г. предложен алгоритм сезонной коррекции эмиссий. Отдельное внимание уделено анализу предсказуемости эпизодов резкого повышения уровня PM₁₀, связанных с ослабленным атмосферным перемешиванием.

Литература:

1. Воздействие внешних частиц на здоровье / Европейское региональное бюро Всемирной организации здравоохранения . URL: <http://www.euro.who.int/> (дата обращения 30.03.2020).
2. И.Н. Кузнецова, И.Ю. Шалыгина, М.И. Нахаев, Ю.В. Ткачева, Г.С. Ривин, А.А. Кирсанов, Д.В. Борисов, Е.А. Лезина. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей. //Труды «Гидрометцентра России». 2019. Выпуск 374. С. 203-218.

Сравнение результатов измерений и моделирования изменчивости интегрального содержания двуокиси азота и формальдегида в пограничном слое атмосферы в Московской области

Боровский А.Н.¹, Еланский Н.Ф.¹, Елохов А.С.¹, Кирсанов А.А.², Пономарёв Н.А.¹, Постыляков О.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

alexander.n.borovski@gmail.com

Ключевые слова: дифференциальная спектроскопия, двуокись азота, формальдегид, COSMO-Ru7-Art, SILAM, загрязнение воздуха

Московский мегаполис входит в число 20 крупнейших мегаполисов мира. Интенсивные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу влияют на качество атмосферного воздуха региона. Для оценки этого воздействия интенсивно разрабатываются методы измерений загрязнения воздуха, а также развивается моделирование переноса химических веществ.

В докладе представлены предварительные результаты сравнения измеренных по методике DOAS и смоделированных с помощью SILAM и COSMO-Ru7-Art интегрального содержания (ИС) двуокиси азота (NO_2) и формальдегида (HCHO) в пограничном слое атмосферы (ПСА) на Звенигородской научной станции (ЗНС). ЗНС расположена в 38 км к западу от Москвы. Сравнение охватывает январь и июль 2014 года, когда над ЗНС наблюдались фоновая и загрязненная Москвой воздушные массы.

Измеренное ИС NO_2 в ПСА, наблюдаемое на ЗНС, не превышает $0,5 \times 10^{16}$ молек $\times$ см⁻² в фоновых условиях, когда преобладают ветры направлений, отличных от восточных. ИС NO_2 вырастает до $5,4 \times 10^{16}$ молек $\times$ см⁻² при переносе к ЗНС загрязненных воздушных масс от московского мегаполиса. Моделированная изменчивость ИС NO_2 имеет аналогичное поведение. В целом наблюдается хорошее согласие между измеренными и смоделированными наборами данных. Некоторая недооценка выбросов NO_2 представлена для источников, расположенных к югу, юго-востоку и юго-западу от ЗНС, а выбросы от источников, расположенных к северу, северо-востоку и северо-западу от ЗНС, несколько завышены.

Измеренное ИС HCHO в ПСА не превышает 6×10^{16} молек $\times$ см⁻² в фоновых условиях и показывает значительный температурный тренд. Статистически значимая разница наблюдается между данными, полученными при восточном и западном направлениях ветра. Этот эффект подтверждает влияние мегаполиса Москвы на качество воздуха в региональной атмосфере. Смоделированное ИС HCHO с использованием обоих ХТМ намного меньше, чем измеренное, однако моделирование воспроизводит основные закономерности измеренных вариаций ИС HCHO .

Данное исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-05-00826 (в области разработки алгоритмов оценки ИС NO_2 и HCHO) и гранта Российского научного фонда № 16-17-10275 (в области моделирования ХТМ).

Альbedo подстилающей поверхности и климатические параметры атмосферы в Российской Арктике весной

Виноградова А.А.¹, Титкова Т.Б.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия
anvinograd@yandex.ru

Ключевые слова: *Российская Арктика, состав и параметры атмосферы, альbedo поверхности, черный углерод, приходящая солнечная радиация, температуры приземного воздуха, количество осадков*

Работа посвящена анализу закономерностей временной и пространственной изменчивости ряда климатических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в Российской Арктике. Рассмотрены четыре тестовых района вблизи арктического побережья: на Кольском п-ве (КП), в Ненецком АО (НАО) вблизи Печорского моря, на Гыданском п-ове (ГП), в нижнем течении реки Лена (НЛ). Изучались временные вариации ежедневных значений альbedo поверхности (А), содержания черного углерода (black carbon – BC) в столбе атмосферы, потока приходящей коротковолновой солнечной радиации (SW) вблизи поверхности, температуры приземного воздуха (Т), количества твердых (S) и жидких (R) осадков. Использованы данные реанализа спутниковой информации и измеренных величин MERRA-2 и WATCH для апреля 2010-2016 годов. Оценка изменчивости и корреляции рассматриваемых величин проводилась с помощью многофакторного регрессионного анализа.

В ходе анализа обнаружены следующие пространственные различия величин изучаемых параметров. С запада на восток вдоль Российского побережья Северного Ледовитого океана (СЛО) средняя температура воздуха снижается (от $-0,5^{\circ}\text{C}$ до $-13,1^{\circ}\text{C}$). Альbedo в среднем самое высокое в районе ГП (самая северная территория, где много снега), а самое низкое – в районе КП, где средняя Т уже около 0°C и снег протаивает с образованием площадок с низким А. Содержание BC в столбе атмосферы вдоль побережья СЛО изменяется в пределах $\pm 10\%$ от среднего, с наибольшим значением в районе НЛ. На европейских территориях (КП, НАО) количество твердых и дождевых осадков в апреле почти одинаково, тогда как в азиатской части (ГП, НЛ) снег ещё заметно преобладает. Меньше всего солнечной радиации поступает к поверхности в районе НЛ, что может быть связано с частой облачностью и туманами, характерными для этой части побережья СЛО.

Исходя из многофакторных регрессионных зависимостей, поправки к температуре за счет статистических вариаций (в пределах СКО) рассматриваемых параметров не превышают 5°K . Вариации радиационного форсинга альbedo поверхности (при изменении А в пределах СКО) в апреле для рассматриваемых площадок возможны от 12% в районе КП до 26% в районе НЛ.

Трактовка полученных зависимостей и корреляций величин рассматриваемых параметров с точки зрения физических механизмов тех или иных связей может быть неоднозначной и требует дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№ 18-05-60183, 18-05-60216.

Влияние карантина весной 2020 года на снижения транспортной активности и качества воздуха в Москве

Гинзбург А.С.¹, Семенов В.А.^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

gin@ifaran.ru

Ключевые слова: COVID-19, качество атмосферные примеси, городской транспорт

Весной 2020 года - с конца марта по начало июня - в Москве карантин, обусловленный пандемией коронавируса COVID-19, резко уменьшил количество автомобилей на улицах города и соответственно объем выбросов загрязняющих веществ городским транспортом. При этом загрязнение городского воздуха от других источников, таких как промышленность, полигоны твердых бытовых отходов и др. изменилось не так значительно. Таким образом был поставлен уникальный эксперимент по оценке влияния различных антропогенных воздействий на загрязнение и состав атмосферного воздуха. Анализ данных ГПБУ «Мосэкомониторинг» за первое полугодие 2020 года выявил снижение различие характер изменений уровня загрязнения атмосферного воздуха во время карантина вблизи автомагистралей и в жилых районах. Особенно ярко эти различия проявляются в данных о концентрации угарного газа.

В конце марта - самом начале карантина весной 2020 года в московском регионе сложились неблагоприятные метеорологические условия с очень высоким уровнем загрязнения приземного воздуха. В апреле и мае воздух Москвы очистился по двум причинам: за счет снижения транспортной активности и за счет отсутствия неблагоприятных метеорологических условий. Такое сочетание природных и антропогенных факторов затрудняет оценку «очищающего» эффекта карантина весной 2020 года на концентрацию газовых и аэрозольных загрязнителей воздуха и требует тщательного анализа многолетних рядов наблюдений за качеством воздуха в Москве и других мегаполисах для определения вклада различных сфер городского хозяйства (транспорта, энергетики, промышленности, переработки отходов) в суммарное загрязнение воздуха больших городов.

Работа выполнена при информационной поддержке Департамента природопользования и охраны окружающей среды города Москвы в рамках проектов РНФ № 18-05-60216 и РФФИ № 20-05-00254.

Литература:

Гинзбург А.С., Семенов В.А., Семутникова Е.Г., Алешина М.А., Захарова П.В., Лезина Е.А. Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве. 2020. Докл. РАН. Науки о Земле

Оценка последствий переноса пылевого аэрозоля на территорию Северной Китайской Равнины

Горчаков Г.И.¹, Карпов А.В.¹, Копейкин В.М.¹, Даценко О.И.^{1,2}, Гушин Р.А.^{1,2}

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия*

gengor@ifaran.ru

Ключевые слова:

Ключевые слова: опустынивание, пылевой аэрозоль, дальний перенос, обратные траектории, оптические и микрофизические характеристики аэрозоля, аэрозольная оптическая толщина, альbedo однократного рассеяния, аэрозольный радиационный форсинг

Выполнено исследование влияния пылевых выносов с опустыненных территорий на оптические характеристики аэрозоля Северной Китайской Равнины. Процессы выноса контролировались с использованием обратных траекторий переноса воздушных масс.

Проанализированы вариации аэрозольной оптической толщины (АОТ) при заносах пылевого аэрозоля на Северную Китайскую Равнину. Оценена изменчивость спектральной зависимости АОТ в запыленной атмосфере г. Пекина.

Охарактеризована микроструктура поглощательной способности пылевого аэрозоля на Серной Китайской Равнине по данным AERONET.

Приведены результаты количественной оценки радиационного форсинга пылевого аэрозоля.

Выполнено сопоставление характеристик пылевого аэрозоля с характеристиками дымной мглы и смога на Северной Китайской Равнине [1].

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 20-17-00214).

Литература:

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Горчакова И.А., Гушин Р.А., Даценко О.И. Смог и дымная мгла на Северо-Китайской равнине в июне 2007 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 6. С. 458–464.

Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в крупномасштабной дымной мгле

Горчаков Г.И.¹, Карпов А.В.¹, Семутникова Е.Г.², Копейкин В.М.¹, Гушин Р.А.^{1,3}, Даденко О.И.^{1,3}, Пономарева Т.Я.⁴

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова Физический факультет, Москва, Россия

³МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия

⁴Гидрометцентр России, Москва, Россия

gengor@ifaran.ru

Ключевые слова: климат, крупномасштабные дымки, радиационный режим атмосферы, дымовой аэрозоль, оптические и микрофизические характеристики, мониторинг

Крупномасштабные дымки, включая дымную мглу, заметно влияют на радиационный режим атмосферы. В связи с глобальным потеплением их влияние на климат может увеличиться. Рекордное по масштабам задымление наблюдалось в июле 2016 г. при распространении сибирской дымной мглы по территории Северной Евразии [1,2]. В процессе переноса задымленного воздуха происходит его фотохимическая трансформация, которая приводит к появлению малолетучих газовых соединений и росту частиц дымового аэрозоля благодаря гетерогенной конденсации вышеуказанных примесей и, как следствие, к уменьшению поглощательной способности дымового аэрозоля. Слабопоглощающий дымовой аэрозоль (“белый дым”) многократно наблюдался при крупномасштабных задымлениях европейской территории России и Сибири. Важной особенностью аэрозоля в крупномасштабной дымной мгле является доминирование тонкодисперсной фракции. Для оценки радиационного режима атмосферы при дальнем переносе фрагментов дымной мглы используются данные AERONET, данные мониторинга аэрозольной оптической толщины и результаты спутникового лидарного зондирования вертикальных профилей коэффициента ослабления.

Литература:

1. Горчаков Г.И., Голицын Г.С., Ситнов С.А., Карпов А.В, Горчакова И.А., Гушин Р.А., Даденко О.И. Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г // Доклады академии наук 2018. Т 482. № 2. С. 211-214.
2. Горчаков Г.И. и др. Крупномасштабные дымки Евразии летом 2016 г // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 3. С. 41-51.

30 лет зондирования вертикального распределения и общего содержания NO₂ в ИФА им. А.М. Обухова РАН

Груздев А.Н., Елохов А.С.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

a.n.gruzdev@mail.ru

Ключевые слова: NO₂, NDACC, спектрометрические измерения, вертикальное распределение, общее содержание, тренды, межгодовая изменчивость

Измерения вертикального распределения и общего содержания NO₂ выполняются с 1990 г. на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН (ЗНС), расположенной в западном Подмоскowie. Станция входит в международную Сеть по обнаружению изменений состава атмосферы (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change – NDACC). Измерения выполняются в утренние и вечерние сумерки по рассеянному из зенита солнечному излучению в видимой области спектра. Вертикальный профиль NO₂ определяется путем решения обратной задачи, и по нему рассчитывается интегральное (общее) содержание NO₂ [1]. Уникальность измерений на ЗНС состоит в том, что это единственная в мире станция дистанционного зондирования вертикального распределения NO₂. Тридцатилетний ряд измерений позволил выполнить всесторонний анализ изменений содержания NO₂ в широком диапазоне временных масштабов от суточного до многолетнего. В частности, получены сезонно-зависимые оценки линейных трендов NO₂, оценки воздействия на NO₂ 11-летнего солнечного цикла, вулканического стратосферного аэрозоля, квазидвухлетней цикличности, Североатлантического и Эль Ниньо–Южного колебаний. Получен отрицательный, статистически значимый тренд стратосферного содержания NO₂ выше 30 км. Уменьшение содержания NO₂ составляет 5% за 10 лет и более. Тренд усиливается с высотой. Содержание NO₂ в приземном слое атмосферы возрастает зимой. Тренд NO₂ в тропосфере имеет положительные или отрицательные значения в зависимости от времени суток и сезона. Значительные межгодовые изменения стратосферного содержания NO₂ связаны с 11-летним солнечным циклом и квазидвухлетней цикличностью. Уменьшение общего содержания NO₂ после извержения вулкана Пинатубо составило 20–30%, но в слое вулканического аэрозоля (в окрестности высоты 20 км) уменьшение было намного сильнее.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-05-00274.

Литература:

1. Елохов А.С., Груздев А.Н. Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 831–846.

Субмикронный аэрозоль и двуокись азота в приземном слое атмосферы на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН: 30 лет измерений

Груздев А.Н., Исаков А.А., Елохов А.С., Аникин П.П.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

a.n.gruzdev@mail.ru

Ключевые слова: аэрозоль, двуокись азота, приземный слой, долговременные изменения

На Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН (ЗНС), расположенной в лесистой местности западного Подмосковья, на протяжении 30 лет выполняются измерения массовой концентрации субмикронного аэрозоля и содержания двуокиси азота (NO_2) в приземном слое атмосферы. Концентрация аэрозоля определяется по измерениям коэффициента направленного светорассеяния (под углом 45°) [1]. Содержание NO_2 измеряется оригинальным методом по рассеянному из зенита солнечному излучению видимой области спектра [2]. Приземное содержание NO_2 испытывает суточные и годовые вариации. Годовой ход NO_2 имеет зимний максимум, вызванный более частыми и сильными эпизодами загрязнения. Выполнен анализ аномалий содержания аэрозоля и NO_2 и выявлена роль атмосферного переноса в аномалиях. Получены оценки многолетних трендов аэрозоля и NO_2 . Выявлено уменьшение массовой концентрации аэрозоля на протяжении всего периода измерений. Тренд аэрозоля в 1991–2012 гг. обусловлен зимне-весенними сезонами. Сильный отрицательный тренд в 2013–2019 гг. обусловлен летним сезоном. Его вероятной причиной послужило уменьшение эмиссии летучих органических соединений в результате значительного летнего похолодания в регионе и усыхания и еловых лесов. Выявлено значительное многолетнее увеличение содержания NO_2 в приземном слое атмосферы в зимний и весенний сезоны. Линейный тренд NO_2 зимой составляет около 20% за 10 лет в утреннее время и около 30% за 10 лет в вечернее время.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-05-00274.

Литература:

1. Груздев А.Н., Исаков А.А., Аникин П.П. Многолетние тренды массовой концентрации приземного аэрозоля на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. – № 12. С. 957–964.
2. Gruzdev A.N., Elokho A.S. Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // Internat. J. Remote Sens. 2011. V. 32. No 11. P. 3115–3127.

Изменчивость приземного аэрозоля в Москве при снижении антропогенной нагрузки весной 2020 года

Губанова Д.П.¹, Скорород А.И.¹, Минашкин В.М.², Иорданский М.А.³

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²АО «ВНИИХТ», ГК «Росатом», г. Москва, Россия

³АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», ГК «Росатом», Москва, Россия

gubanova@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосфера, Москва, сезонные наблюдения, аэрозольные частицы, PM_{2.5}, PM₁₀, концентрация, элементный состав, режим самоизоляции, COVID-19, антропогенная нагрузка

Исследование сезонных закономерностей изменения параметров приземных аэрозолей в условиях крупного промышленного мегаполиса представляет большой интерес для оценки влияния различных антропогенных и природных факторов на атмосферные процессы с участием аэрозолей. Весной, в неустойчивый переходный период синоптических и метеорологических явлений, изменчивость аэрозолей проявляется наиболее значительно вследствие их сильной зависимости от локальных и региональных источников, а также от дальнего переноса.

Работа посвящена изучению вариаций микрофизических параметров приземного аэрозоля г. Москвы при снижении антропогенной нагрузки (приостановка деятельности большинства предприятий, снижение интенсивности движения транспорта и др.) в период реализации мероприятий по нераспространению коронавирусной инфекции. Наблюдения дисперсного состава, массовой и счетной концентрации аэрозольных частиц проводились в марте-апреле 2020 года в ИФА РАН, Пыжевский пер., 3. В исследуемый период выявлены заметные колебания концентрации приземного аэрозоля. Установлено, что резкие всплески концентрации частиц PM_{2.5} и PM₁₀ в основном связаны с перестройкой синоптических процессов в атмосфере и частым изменением траекторий циклонов. Заметное влияние снижения антропогенной нагрузки на содержание атмосферных аэрозолей в воздухе г. Москвы не выявлено. Максимальные значения концентрации аэрозольных частиц PM_{2.5} и PM₁₀ зарегистрированы 26-29 марта, во время установления режима самоизоляции населения г. Москвы и проведения дезинфекции городских улиц, и составили 19-32 и 68-131 мкг/м³ соответственно. Этот сильный рост (на порядок величины) концентрации приземных аэрозолей обусловлен поступлением аэрозолей горения с воздушными массами Ю и ЮЗ направления из районов многочисленных локальных очагов пожаров. Выполнено сопоставление с данными наблюдений на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг», показавшее хорошее согласие полученных результатов. Проведен сравнительный анализ с многолетними данными сезонных наблюдений аэрозолей в г. Москве. Обсуждаются другие возможные источники аэрозолей с учетом сложившихся весной 2020 г. нетипичных условий наблюдений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-05-00352 и 19-05-50088.

Микрофизические параметры приземного аэрозоля в Подмоскowie

Исаков А.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

a.a.isakov@mail.ru

Ключевые слова: приземный аэрозоль, обратная задача, микрофизические параметры

В предлагаемом докладе рассматриваются результаты статистического анализа микрофизических параметров субмикронного аэрозоля – показателя преломления n вещества частиц и величины радиуса максимума распределения объемов частиц по размерам r . Микрофизические параметры n и r оценивались решением задачи обращения спектральных зависимостей поляризационных компонент индикатрисы рассеяния света приземным аэрозолем на сетке значений величин показателя преломления $n=1.38-1.59$ с шагом $\delta n=0.03$. Рассмотрены данные, полученные для сухой основы частиц в первой половине 2008 года на Звенигородской научной станции. Минимальные значения $n-1.38$, максимальные $-n=1.59$, среднее значение- $n=1.53$, среднеквадратичное отклонение -0.03 . Гистограмма распределения величины n существенно асимметричная – левое крыло распределения -минимальных значений- существенно длиннее, чем правое, на область максимума распределения приходится около 30% случаев. Положение максимума распределений объемов частиц по размерам изменяется в пределах $r=0.07-0.2$ мкм, максимум гистограммы распределения r max приходится на величину $r=0.13$ мкм, стандартное отклонение -0.02 . Здесь гистограмма имеет приблизительно симметричный вид. Во временной развертке величины показателя преломления просматриваются квазипериодические вариации с периодом в двое-трое суток, более долгопериодные колебания выражены слабо. Кривые зависимости $dV(r)/dr$ как правило имеют минимум в области $r=0.6-0.7$ мкм. Важной характеристикой распределения объемов по размерам служит крутизна спада этой величины в диапазоне радиусов $r=0.1-0.6$ мкм. Поскольку поведение ее приблизительно описывается обратностепенным законом, для ее оценки можно ввести параметр, аналогичный параметру Ангстрема. Оценки показали, что этот параметр изменяется в пределах $p \approx 1-2.5$

Работа выполнена по теме госзадания №0129-2019-0002

Суточная динамика летней эмиссии метана на примере термокарстового озера Центрального Ямала

Казанцев В.С., Кривенок Л.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

kazantsev@ifaran.ru

Ключевые слова: Метан, суточная динамика, озеро, Ямал, Арктика, парниковые газы, эмиссия.

Метан - один из основных парниковых газов земной атмосферы. Озёра являются третьим по мощности природным источником метана в глобальном масштабе [Kirschke et al., 2013].

Цель настоящей работы - изучение суточной динамики летней эмиссии метана из термокарстового озера полуострова Ямал.

Исследование проводилось методом статических плавающих камер 19-20 августа 2019 года на одном из озёр Центрального Ямала в районе полевого научно-исследовательского стационара "Васькины дачи". Отбор проб и расчёты удельных потоков метана (УПМ) проводились по методологии, описанной в [Bastviken et al., 2010]. Измерения осуществлялись в двухкратной повторности каждые два часа в одной точке в центральной части озера.

Основываясь на зависимости, полученной нами ранее для другого термокарстового озера тундры Западной Сибири [Kazantsev et al., 2018], суточная динамика УПМ была аппроксимирована функцией следующего вида:

$F = (0.048 \pm 0.005) + (0.003 \pm 0.0004)T_{air} \sin(2\pi((-3.041 \pm 0.567) - h)24^{-1})$, где F - УПМ,

$\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, T_{air} - температура воздуха на высоте 0.1 м, °С, h - представленное в виде десятичной дроби время середины измерения. Коэффициент несовпадения Тейла для данной модели составляет 0.11, что говорит о достаточно хорошем качестве аппроксимации

Средние значения УПМ с поверхности изученного озера для параллельных измерений в течение суток изменяются от 0.02 до 0.12 $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Литература:

1. Bastviken D. et al. (2010) Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental science & technology*, 44(14), 5450-5455.
2. Kazantsev V.S. et al. (2018) Methane emission from thermokarst lakes in the southern tundra of Western Siberia. *Geography, Environment, Sustainability*, 11(1), 58-73.
3. Kirschke S. et al. (2013) Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6(10), 813-823.

Влияние атмосферных окислительных процессов на оптические свойства и состав дымового аэрозоля: анализ спутниковых данных и моделирование

Коновалов И.Б.¹, Головушкин Н.А.¹, Beekmann M.²

¹Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

²Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA), CNRS, Creteil, France

konov@ipfran.ru

Ключевые слова: дымовой аэрозоль, спутниковые измерения, природные пожары, вторичный органический аэрозоль

Углеродсодержащий аэрозоль, образуемый в результате природных пожаров, является одной из важнейших климатически значимых примесей атмосферы, а также существенно влияет на качество окружающего воздуха. Вместе с тем, современные оценки климатических эффектов дымового аэрозоля и модельные расчеты загрязнения атмосферы вследствие пожаров характеризуются большими неопределенностями, связанными, в частности, с ограниченным знанием сложных трансформаций, которые дымовой аэрозоль претерпевает в атмосфере.

В данной работе спутниковые измерения, выполненные инструментами OMI и MODIS, проанализированы с помощью расчетов на базе химико-транспортной модели CHIMERE с целью выявления и интерпретации эффектов атмосферного старения дымового аэрозоля, определяемых окислительными процессами. Регион и период анализа охватывали эпизод дальнего переноса плотных дымовых шлейфов из Сибири на Европейскую территорию России, который наблюдался летом 2016 г. В результате анализа выявлены значительные изменения абсорбционной и полной аэрозольных оптических толщин, а также альбеда однократного рассеяния в зависимости от фотохимического возраста аэрозоля, которые, согласно соответствующим модельным расчетам, могут быть вызваны окислительными процессами, приводящими к образованию и последующему разрушению вторичного органического аэрозоля. Указанные процессы приводят к существенным изменениям не только оптических свойств аэрозоля, модифицируя распределение частиц аэрозоля по размерам и изменяя содержание органических хромофоров (коричневого углерода) в них, но и углеродного состава и гигроскопических свойств аэрозоля. Выполненное исследование открывает новые возможности для достижения лучшего понимания роли дымового аэрозоля в климатообразующих процессах, в том числе в Арктике, и для усовершенствования расчетов эволюции дымового аэрозоля на основе химико-транспортных моделей.

Работа выполнена за счет гранта РНФ №19-77-20109.

Вариации содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью Атлантического океана

Копейкин В.М.¹, Артамонов А.Ю.¹, Бубнова Е.С.², Гречко Е.И.¹, Малафеев Г.В.², Новигадский А.Н.², Пономарева Т.Я.³, Шевченко В.П.², Соленая О.А.¹, Репина И.А.¹, Шишов Е.А.¹

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

³*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия*

kopeikin@ifaran.ru

Ключевые слова: радиационно-климатические процессы, аэрозоль, сажа, загрязнение атмосферы, пространственно-временная изменчивость и перенос воздушных масс

Нами выполнены измерения массовой концентрации сажи и субмикронного аэрозоля в приводном слое атмосферы в 2-х рейсах НЭС «Академик Федоров» 4.11.2009 – 17.2.2010 и 10.11.2011 – 12.2.2012 по маршруту Санкт-Петербург – Антарктида - Кейптаун и в рейсе НИС «Академик Иоффе» 19.3 – 27.4.2011 по маршруту г. Ушуйя (Аргентина) – порт Гданск (Польша). В 2-х рейсах НЭС «Академик Федоров» 28.2 – 11.5.2015 и 5.4 – 29.5.2016 по маршруту Кейптаун - Антарктида - Санкт-Петербург осуществлены измерения массовой концентрации сажи. В 33-й рейсе « Ак. Н. Страхов» 30.10 – 11.12.2016 и 2-х рейсах АМК-68 и АМК-71 «Ак. Мстислав Келдыш» 30.6 – 15.7.2017. и 24.6 -- 5.8 2018 проведены исследования вариаций концентрации сажи по долготным маршрутам в Атлантическом океане в Северном полушарии.

Вдоль побережья Южной Америки в Южном полушарии от 66° до 23° ю.ш. отбор проб аэрозоля осуществлялся из воздушных масс, прошедших над континентом Южной Америки и подвергшимся, как антропогенным загрязнениям, так и выносам пылевого аэрозоля. Средняя концентрация сажи в этих случаях в 2011, 2015 и 2016 гг. составила 53, 152 и 83 нг/м³. Вдоль континента Африки по маршруту от 43° до 7° ю.ш., когда траектории переноса воздушных масс проходили над водной поверхностью, средняя концентрация сажи равна 157 и 124 нг/м³ в 2009 г. и 2011 г., соответственно.

В Южном полушарии вдоль Африки, в ноябре – декабре 2009 г. и 2011 г., наблюдалась широтная изменчивость содержания сажи: средняя концентрация сажи от экватора до 25° ю.ш. при восточных ветрах от Африки уменьшилась в 1,5 раза, а при ветрах западного направления на участке 25 - 60° ю.ш. – в 2,5 раза.

В Северном полушарии минимумы концентрации сажи наблюдались в районе 30 и 48° с.ш. при поступлении воздушных масс из западных районов Атлантического океана. Характерным является наличие областей с высоким уровнем загрязнения сажей в районе 10, 40 и 55° с.ш. Максимумы концентрации сажи на маршруте 10 – 25° с.ш. в 2009 г. и 2011 г. наблюдались в воздушных массах, поступивших из Атлантического океана и затем переместившихся по дуге над сухой северо-западных территорий Африки (Северная Сахара, Мавритания, Марокко и Алжир).

Вариации концентрации субмикронного аэрозоля в экспедициях 2009 г. и 2011 г. имеют, в основном, схожий вид с вариациями концентрации сажи, за исключением района 0 – 20° с.ш., где в 2011 г. отсутствует пик субмикронного аэрозоля.

Антициклоническая циркуляция в острове тепла

Кочин А.В.

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

amarl@mail.ru

Ключевые слова: остров тепла, антициклоническая циркуляция, бризовая циркуляция, распространение примесей над городом

По существующим представлениям нагретый объем воздуха над городом, который называется городским островом тепла (ОТ), вызывает появление восходящего потока воздуха над городом. Восходящий поток должен уменьшать степень загрязнения воздуха, так как уносит примеси от источников на поверхности. Поэтому основным фактором, вызывающим увеличение загрязнений в городе, должны быть приземные инверсии температуры, но интенсивные загрязнения наблюдаются также при их отсутствии. Предлагается принципиально иную структура воздушных потоков в ОТ с бризовой циркуляцией с восходящим потоком на периферии и антициклонической циркуляцией с нисходящим потоком по центру ОТ. Такая циркуляция удержит примеси над городом даже при умеренном ветре и отсутствии инверсий. Подобная циркуляция будет реализовываться над любой нагретой поверхностью, поэтому проекты по вызыванию осадков путем радиационного нагрева подстилающей поверхности выглядят маловероятными. Результаты исследования позволят лучше прогнозировать уровень загрязнений в городах и, возможно, разработать меры по снижению их уровня.

Бериллий-7 в приземном слое атмосферы сева­стопольского региона в период 2011–2016 гг.

Кременчуцкий Д.А.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

d.kremenchutsky@gmail.com

Ключевые слова: бериллий-7, временная изменчивость, атмосферные аэрозоли, метеопараметры, солнечная активность

Бериллий-7 – естественный радионуклид космогенного происхождения. Данный радионуклид образуется в атмосфере (2/3 в стратосфере, 1/3 в тропосфере) в результате взаимодействия потока космических лучей с легкими атмосферными ядрами. После образования бериллий-7 быстро адсорбируется на частицы аэрозолей и дальнейшее распределение его концентрации в атмосфере тесно связано с переносом аэрозолей и факторами, их определяющих. Цель исследования заключается в получении количественных оценок влияния метеопараметров и солнечной активности на временную изменчивость концентрации бериллия-7 на различных (суточный, сезонный, межгодовой) масштабах времени.

В работе представлены результаты мониторинга временной изменчивости концентрации бериллий-7 на атмосферных аэрозолях в приземном слое атмосферы сева­стопольского региона в период с 2011 по 2016 гг. Пробы аэрозолей отбирались ежесуточно с использованием высокопроизводительной воздухофилтрационной установки (525 м³/час) на фильтр-полотно Петрянова ФПП-15-1,5. Определение активности радионуклида на аэрозолях проводилось с использованием низкофонового гамма-спектрометра со сцинтилляционным детектором NaI(Tl). Данные о метеопараметрах были получены профессиональной автоматической метеостанцией, расположенной в месте отбора проб аэрозолей.

За исследуемый период концентрация бериллия-7 изменялась во времени от 0,2 до 10,2 мБк/м³ и составляла в среднем $3,5 \pm 1,7$ мБк/м³. Повышенные величины концентрации были характерны для весенне-летнего сезона, пониженные – для зимнего. В работе получены количественные оценки влияния метеопараметров и солнечной активности на временную изменчивость концентрации бериллия-7 на различных масштабах времени. Показано, что на межгодовом масштабе времени наиболее влияние оказывает солнечная активность, на сезонном – температура, на суточном – осадки.

Временные ряды были получены в рамках государственного задания по теме №0827-2020-0004, анализ данных был выполнен в рамках проекта РНФ № 20-77-00024.

Свинец-214 в приземном слое атмосферы севастопольского региона

Кременчуцкий Д.А.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Ключевые слова: свинец-214, атмосферный аэрозоль, временная изменчивость, метод непрерывного мониторинга

Свинец-214 (далее свинец) – это естественный радионуклид природного происхождения. Период полураспада свинца 26,8 минут. Данный радионуклид является одним из дочерних продуктов распада радона-222 (период полураспада 3,82 дня) и образуется в результате распада полония-218 (3,1 мин). Концентрации радона-222 и свинца-214 в приземном слое атмосферы соотносятся в среднем как 1:0,7. Свинец и висмут-214 являются основными гамма-активными радионуклидами в приземном слое атмосферы. Мониторинг концентрации этого радионуклида связан с рутинными операциями, во время которых некоторый объем воздуха прокачивается через аэрозольный фильтр в течении 2-3 часов, а затем проводится гамма-спектрометрический анализ этого фильтра или серия альфа-спектрометрических измерений.

В работе предложен и реализован подход, позволяющий существенно упростить процедуру мониторинга концентрации свинца на атмосферных аэрозолях. Этот подход позволяет получать данные об осредненных за два часа величинах концентрации свинца. Минимально измеряемый уровень концентрации – $0,4 \text{ Бк м}^{-3}$. Погрешность измерений обычно не превосходит 30%.

Используя этот подход были получены временные ряды концентрации свинца на атмосферных аэрозолях продолжительностью 18 месяцев. За этот период было выполнено 5532 определения концентрации радионуклида. Согласно результатам измерений, содержание этого радионуклида изменялось от уровня $<0,4 \text{ Бк м}^{-3}$ (менее 1% данных наблюдений) до $8,9 \text{ Бк м}^{-3}$. Средняя величина – $2,0 \pm 1,0 \text{ Бк м}^{-3}$. В течении суток максимальные величины концентрации были характерны для периода с 5 до 7 часов, минимальные – для периода с 17 до 19 часов. Максимальная амплитуда колебаний концентраций в суточном цикле наблюдалась в летний сезон, минимальная – в зимний. На среднемесячном масштабе времени повышенные величины концентрации наблюдались в период с ноября по февраль, пониженные – с мая по июль.

Данные для исследования были получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0827-2020-0004. Анализ данных проводился при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и города Севастополя, проект № 20-45-920007.

Сценарные модельные оценки вариационных изменений эмиссий антропогенных источников в Москве весной 2020 г. с учетом особенностей погодных условий

Кузнецова И.Н., Борисов Д.В., Кирсанов А.А., Ривин Г.С., Ткачева Ю.В., Шалыгина И.Ю.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
labmuza@mail.ru

Ключевые слова: загрязнение воздуха, НМУ, сценарное моделирование, ХТМ, вариативность эмиссий, COVID-19

Улучшение качества воздуха в Москве весной-летом 2020 г. в связи с изменением режима работы предприятий и потоков транспорта подтверждено инструментальными наблюдениями (<https://mosecom.mos.ru/>). Ориентируясь на официальные данные об уменьшении выбросов в атмосферу, разработаны оценочные сценарии изменения загрязнения воздуха при имитационных эмиссиях отраслевых источников, вариативность загрязнения воздуха проанализирована по результатам модельных расчетов концентраций основных компонентов воздушного загрязнения двух ХТМ, реализованных в Гидрометцентре России (CHIMERE2.2 и COSMO-ART2.2). Интерпретация имитационных результатов проведена с учетом особенностей погодных условий, маскирующих или усиливающих эффекты снижения антропогенной нагрузки, принимая во внимание, что в каждом месяце пандемии COVID-19 в Москве наблюдались погодные аномалии. Март и июнь были теплее обычного, апрель и май - холоднее; во все месяцы, за исключением апреля, дождей выпадало в 1,5-2,3 раза больше нормы. Зафиксированные погодные аномалии хорошо коррелируют с индексами крупномасштабной циркуляции: NAO в марте был положительным, с апреля по июль находился в отрицательной фазе, при том, что в апреле прошлого года $NAO = 0,47$, в 2020 г. $NAO = -1,02$. Аномалии погоды сопровождалась интенсивным переносом воздушных масс, даже в АПС скорость переноса в апреле-июне 2020 г. в среднем за месяц была на $1,5 - 2 \text{ м с}^{-1}$ больше, чем в 2019 г. Как следствие, частота неблагоприятных для очищения воздуха метеоусловий в период март-июль была в 2 раза меньше, чем в 2019 г. Наши расчеты подтвердили, что наибольший эффект карантинного сокращения эмиссий в период пандемии COVID-19 обнаруживался в эпизодах НМУ.

Зависимости приземного содержания малых газов от основных метеорологических величин в городах России и Индии

Локощенко М.А.^{1,2}, Богданович А.Ю.¹, Еланский Н.Ф.², Гоуда К.Ч.³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³CSIR Fourth Paradigm Institute (C-MMACS), Bangalore, India

loko@geogr.msu.su

Ключевые слова: эмпирические функции, малые газы, приземное содержание, метеорологические величины, накопление примесей, акустическое зондирование, термическая конвекция, инверсии

Исследованы эмпирические функции приземного содержания основных газовых примесей (озона, окиси и двуокиси азота, окиси углерода и двуокиси серы), а также углекислого газа от температуры воздуха T , скорости ветра V и относительной влажности F . Анализ для условий Москвы проведён по данным совместной экологической станции ИФА РАН и МГУ в среднем за каждый час за период 2002-2014 гг., а также станционных наблюдений и акустического зондирования в Метеорологической обсерватории МГУ. Размеры выборок составили от 80 до 101 тысяч часовых значений для разных газов. Полученная эмпирическая функция O_3 от T в диапазоне от -30 до $+38$ °C показывает отсутствие значимых изменений при $T < 15$ °C и устойчивый рост с увеличением T , начиная с $+15$ °C. Очевидными причинами этого роста служат фотохимические реакции образования O_3 и усиление его притока к поверхности из вышележащих слоёв при термической конвекции в антициклональных условиях летом. Аналогичные зависимости NO и NO_2 показывают быстрый рост с уменьшением T от -5 до -20 °C, видимо, связанный с усилением выбросов городского отопления и дополнительным накоплением примесей в условиях преобладающих инверсий. Содержание SO_2 в силу тех же причин быстро растёт с уменьшением T при $T < -20$ °C. Для CO_2 характерно общее уменьшение с ростом T , отражающее годовой ход этого газа, связанный с фотосинтезом при активной вегетации растениями летом. Зависимости содержания большинства примесей от V , кроме O_3 , характеризуются их уменьшением с усилением ветра; для CO_2 характерен также вторичный максимум при сильном ветре (13-15 м/с), предположительно связанный с дальним переносом. Зависимость O_3 от V в целом противоположная, что отражает его динамический приток к поверхности при усилении ветра. С ростом F содержание O_3 уменьшается, а NO и NO_2 в целом растёт. Сходный анализ проведён для условий Бангалора; в результатах выявлено значительное влияние летнего муссона.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 18-55-45012 и РНФ № 16-17-10275.

Литература:

1. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой. Известия РАН. Серия Физика атмосферы и океана, 2015, том 51, № 1, стр.39-51.
2. Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Трифанова А.В. Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха в Москве. М., Вестник РАН, 2014, том 14, № 1, стр.64-67.

Методика оценки экологических рисков (рисков здоровью) от загрязнения атмосферы Байкальского региона в условиях изменяющегося климата

Макоско А.А., Матешева А.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
matesheva@ifaran.ru

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, изменение климата, экологический риск, риск здоровью, Байкал

Оценки (прогноза) экологических рисков от загрязнения атмосферы в Байкальском регионе в условиях изменяющегося климата затруднены вследствие сложности оценки концентраций примесей от значительного числа потенциальных источников, наличия различных механизмов загрязнения воздуха, неопределенности будущего воздействия на атмосферу и др. С учетом этого предложена методика оценки риска здоровью от загрязнения атмосферы Байкальского региона на основе решении сопряженной задачи эволюции примеси [1] и специального функционала с учетом концепции оценки риска U.S. EPA [2]. Отметим, что идеологически методика близка к алгоритму [3].

Для апробации исследована динамика единичного нормированного риска здоровью от загрязнения атмосферы SO₂ в 1980–2050 гг. на Байкальской природной территории (БПТ), который может создавать потенциальный источник, расположенный в различных областях относительно БПТ (в т.ч. внутри нее), при «умеренном» (RCP4.5) и «жестком» (RCP8.5) сценариях изменения климата МГЭИК.

При обоих сценариях отмечается тенденция к улучшению условий рассеивания примесей. Как следствие в 2005–2010 гг. начинается стойкое сужение зоны расположения источников SO₂, создающих риск на БПТ. На порядок снижается опасность для здоровья от источников, расположенных вне БПТ. При этом по сравнению с пространственно-временной динамикой уровней риска, их межсценарная изменчивость выражена незначительно. Главное влияние на БПТ ожидается от источников SO₂, расположенных на 3-ЮЗ направлениях. В отдельные периоды не исключается влияние источников на Ю и ЮВ направлениях (Китай, Монголия). Учитывая неопределенности, свойственные долгосрочным оценкам, полученные результаты следует рассматривать как тенденции изменения экологического риска (риска здоровью).

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 17-29-05102.

Литература:

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
2. Air Toxics Hot Spots Program: Risk Assessment Guidelines. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. — California EPA. — 2015.
3. Penenko, V.V. et al. Methods for studying the sensitivity of air quality models and inverse problems of geophysical hydrothermodynamics // Journal of App. Mech. and Tech. Phys., 2019, V. 60, P.: 392–399.

Городской аэрозоль и его радиационные эффекты по данным эксперимента московского AeroRadCity и данным моделирования COSMO-ART

Чубарова Н.Е.¹, Андросова Е.¹, Кирсанов А.², Вольперт Е.¹, Еремина И.¹, Поповичева О.¹, Ривин Г.С.^{2,1}, Шалыгина И.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометцентр России, Москва, Россия

natalia.chubarova@gmail.com

Ключевые слова: аэрозоль, черный углерод, перенос примеси, моделирование, COSMO-ART, измерения, солнечная радиация, радиационный эффект аэрозоля, поглощающие свойства аэрозоля

По данным комплексного эксперимента AeroRadCity весной 2018 г. и 2019 гг. в метеорологической обсерватории МГУ проведено исследование аэрозольных свойств атмосферы и его радиационных эффектов. Комплекс наблюдений включал измерения аэрозоля в столбе атмосферы по данным AERONET, а также приземные измерения черного углерода (BC), концентрации взвешенных частиц диаметром менее 10 мкм (PM10), различных газов-предшественников аэрозоля, а также метеорологические и радиационные измерения. Характеристики интенсивности рассеивания примесей использовались для оценки взаимосвязи между аэрозольными измерениями в столбе атмосферы и его приземной концентрацией. Проанализированы изменения BC и BC/PM10 за период эксперимента. Получена связь BC/PM10 с величиной альбедо однократного рассеяния аэрозоля для определенных условий атмосферы. Параметризация коэффициента поглощения Ангстрема (AAE) позволила определить периоды влияния на состав аэрозоля источников сжигания биомассы и периоды, когда преобладали эмиссии за счет сжигания природного топлива. Для ясных дней проанализирован аэрозольный радиационный эффект на верхней границе атмосферы, который в среднем составил -8 Втм^{-2} , и изменения которого находились в диапазоне от -20 Втм^{-2} до -1 Втм^{-2} . Минимальные по абсолютной величине значения аэрозольного радиационного эффекта соответствовали наименьшим значениям AOT и низким значениям альбедо однократного рассеяния.

Одновременно проводились модельные аэрозольные эксперименты с использованием химико-транспортной модели COSMO-ART с шагом сетки 7 км и разными эмиссиями газов-предшественников аэрозоля. Получены соотношения между модельными и экспериментальными оценками городского аэрозоля.

Особое внимание уделено анализу влажного осаждения аэрозоля. Проведен ряд численных экспериментов с помощью XTM COSMO-ART с учетом и без учета процессов влажного осаждения. Предложен метод количественной оценки скорости влажного осаждения аэрозоля с использованием экспоненциальных коэффициентов вымывания. По данным экспериментов получено, что при определенных условиях эти коэффициенты значимы для PM ($\alpha(\text{PM})=0.17\pm 0.09 \text{ (час}^{-1}\text{)}$) и незначимы для BC ($\alpha(\text{BC})=0.07\pm 0.10 \text{ (час}^{-1}\text{)}$).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 18-17-00149.

О возможности оценки характеристик аэрозоля и облачности с помощью нейронной сети по данным измерений рассеянного солнечного излучения

Никитин С.В.¹, Чуличков А.И.¹, Боровский А.Н.², Постыляков О.В.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

sv.nikitin@physics.msu.ru

Ключевые слова: дифференциальная спектроскопия, дистанционное зондирование характеристик аэрозоля и облачности, нейронные сети

Характеристики аэрозоля и облачности являются важными для определения методами дифференциальной спектроскопии (DOAS) содержания малых газов (H_2CO , NO_2 и др.) в нижней тропосфере.

В данной работе рассмотрены задачи по оценке параметров аэрозоля (оптическая толщина (aod)), облачности (оптическая толщина (cloudOD), нижняя граница (cloudBaseHeight_km)) и коэффициента связи (FSummer_475) между плотностью наклонного столба следового газа и плотностью вертикального газового столба.

В качестве входных данных используются характеристики измеренного рассеянного солнечного излучения в видимом и УФ диапазонах (оптическая толщина O4, индекс цветности, интенсивность солнечного излучения, значение линейного члена DOAS-анализа) и другие характеристики модели измерений (альbedo подстилающей поверхности, зенитный угол солнца).

Для решения встающих перед нами нелинейных задач оценивания используется нейронная сеть, обученная на входных данных. Эта задача известна в теории машинного обучения как "задача регрессии". Для ее решения нами были изучены несколько различающихся по архитектуре нейронных сетей, оценены получаемые при их использовании характеристики точности, обобщающей способности и скорости обучения.

Исследование проводилось при финансовой поддержке РНФ по проекту 16-17-10275 (расчеты наклонных толщ) и РФФИ по проекту 19-01-00790 (исследование нейронной сети).

Об оценке характеристик рассеяния в атмосфере по спектральным измерениям солнечного излучения с использованием алгоритмов машинного обучения

Никитин С.В.^{1,2}, Чуличков А.И.^{1,2}, Боровский А.Н.², Постыляков О.В.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

sv.nikitin@physics.msu.ru

Ключевые слова: дифференциальная спектроскопия, двуокись азота, восстановление содержания газов по измерениям метода DOAS, искусственные нейронные сети, метод случайного леса

Облачность и аэрозоль оказывают существенное влияние на точности восстановления содержания малых газовых примесей в нижней тропосфере методами дифференциальной спектроскопии (DOAS). Содержание газа в вертикальном столбе атмосферы пропорционально непосредственно получаемой из измерений методом DOAS наклонной толщии газа. При этом коэффициент пропорциональности F , является величиной обратной к так называемой эффективной воздушной массе [1] и рассчитывается с помощью линеаризованной модели переноса излучения в атмосфере [1], в которую закладываются оптические характеристики на момент измерения.

Поскольку наблюдения методом DOAS часто не сопровождаются прямыми измерениями облачности и аэрозоля, то решение задачи определения их характеристик или оценивание непосредственно коэффициента F по самим спектральным измерениям могло бы повысить точность измерения содержания малых газовых примесей. В работе рассматриваются задачи определения характеристик облачности и аэрозоля, а также коэффициента F , по данным измерений рассеянного солнечного излучения двумя методами машинного обучения: искусственных нейронных сетей [2] и случайного леса [3].

В качестве обучающей выборки использовался массив данных, полученных решением задачи переноса излучения методом Монте-Карло. Всего использовалось 672 примера, которые были разделены на три части: обучающую выборку (64% от общего числа примеров), выборку, использованную для валидации при обучении (16%) и тестовую выборку (20%). В методе нейронных сетей использовалась регуляризация в виде ограничения на взвешенную сумму комбинации евклидовой и равномерной норм вектора весов, оптимальные параметры регуляризации определялись как параметры, минимизирующие среднеквадратическую ошибку на тестовой выборке.

На входы алгоритмов машинного обучения подаются значения интенсивности излучения и параметры системы «атмосфера-подстилающая поверхность Земли»: абсолютная интенсивность на 4 длинах волн, наклонная толщина O_4 на 8 длинах волн, индексы цветности в УФ и видимом диапазонах, коэффициент при линейном члене DOAS анализа, зенитный угол Солнца, альбеда подстилающей поверхности. На выходе алгоритмы дают значения оценок оптической толщи облачности, нижней границы облачности в км, оптической толщи аэрозоля и коэффициента F .

Получены предварительные оценки точностей восстановления параметров атмосферы, изучена их изменчивость при вариациях набора входных параметров алгоритмов, характерных для условий измерения двуокиси азота в летний период.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант 19-01-00790 (решение задач оценивания с помощью нейронных сетей) и РНФ грант 16-17-10275 (моделирование измерений типа DOAS для NO_2 и H_2CO).

Литература:

1. Постыляков О.В. Модель переноса радиации в сферической атмосфере с расчетом послойных воздушных масс и некоторые ее приложения. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2004, т. 40, №3, 314–329.
2. Goodfellow I. J., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. The MIT Press, 2016.
3. L. Breiman. Random Forests. Machine Learning 45, 5–32 (2001).

Оценки тенденций изменения межгодового и внутригодового хода аэрозольной и облачной компонент атмосферы в западной части РФ в поствулканический период (наземные, спутниковые наблюдения, реанализ)

Плахина И.Н., Репина И.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

inna@ifaran.ru

Ключевые слова: аэрозоль, степень покрытия небосвода облаками, радиация, наземные наблюдения, спутниковый мониторинг, тенденции изменений, сезонный ход

Аэрозольная оптическая толщина атмосферы (АОТ) и степень покрытия небосвода облаками (СС) являются важными параметрами при изучении региональных климатических проявлений, температуры приземного слоя и приходящей к подстилающей поверхности солнечной радиации. Тем самым, очевидна актуальность работ по оценке фактических и возможных вариаций вышеуказанных факторов АОТ и СС. Сравнительный анализ статистических характеристик синхронизированных рядов АОТ и СС, полученных разными способами регистрации: спутниковыми (MODIS) или наземными (AERONET или стандартная актинометрия) теоретически делает оценки изменчивости более надежными, но на практике осложняет картину ввиду разнонаправленного влияния помех и систематических погрешностей при спутниковом и наземном мониторинге рассматриваемых атмосферных компонент.

В рамках этой проблемы мы провели точечный анализ статистических характеристик межгодового и внутригодового хода АОТ и СС для 21 станции актинометрических наблюдений на территории России в области от 33°вд до 66°вд и 44°сш до 69°сш. Рассмотрели синхронизированные ряды на временном интервале в течение последних 20 лет. Спутниковые наблюдения представлены осредненными суточными величинами АОТ (TERRA/MODIS, <http://modis.gsfc.nasa.gov>). Степень покрытия небосвода облаками скачивалась через специализированный сервер <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>, использовались месячные значения “cloud fraction from cloud mask”, TERRA/MODIS. Использована также база данных (БД) «Аэрозольная оптическая толщина атмосферы по спутниковым и наземным наблюдениям», созданная авторами. В результате получены статистические оценки и тенденции вариаций межгодовых и сезонных значений аэрозольной и облачной компонент, исследована согласованность (расхождение) при спутниковых и наземных способах получения результатов годовых и месячных значений. Проанализированы факторы расхождений (неоднородность и неполнота внутримесячных рядов суточных данных) и способы их минимизации. Для обобщения результатов проведенных оценок и формирования выводов привлекались архивные значения тенденций изменения потоков приходящей к подстилающей поверхности солнечной радиации, а также данные реанализа.

Литература:

1. Plakhina I N, et al. Comparison of ground and satellite monitoring of aerosol optical thickness of the atmosphere over Russia // Modern problems of remote sensing of the Earth from space 2018. 2. 225-34
2. Plakhina I N Database Aerosol optical thickness of the atmosphere by satellite and ground observations // Certificate of state registration 2018
4. Samukova E A, et al. Long-term changes in solar radiation in Europe // Meteorology and hydrology 2014. 8. 15-24

Изучение неопределенности результатов моделирования химико-транспортной модели SILAM о загрязнении приземного слоя атмосферы Москвы

Пономарёв Н.А.^{1,2}, Юшков В.П.², Еланский Н.Ф.¹

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
Москва, Россия*

na.ponomarev@physics.msu.ru

Ключевые слова: мегаполис, качество воздуха, малые газовые составляющие, неопределенность расчетов химико-транспортной модели

Численные модели переноса атмосферных загрязнений от источников разного типа, в том числе в крупных мегаполисах, за последние десятилетия достигли значительного развития. Однако их использование для количественных оценок и прогноза все еще остается сложной задачей, поскольку нам лишь приблизительно известны как источники выбросов, так и характеристики турбулентного переноса, особенно в сильно неоднородной городской среде.

На примере данных натурных измерений на сети станций ФГУП «Мосэкомониторинг» и численных расчетов с помощью химико-транспортной модели SILAM [1, 2] нами было показано, что ошибки численных расчетов концентраций NO, NO₂, CO, O₃ имеют более сложную структуру, чем предполагается в алгоритмах усвоения данных. Эти ошибки являются статистически нестационарными, имеют ярко выраженный суточный ход и значимое время корреляции. Статистические свойства этих ошибок зависят от типа примеси, в том числе химических реакций, в которых она участвует. Анализируя спектральные свойства этих ошибок и их зависимость от положения точек измерений (крупные магистрали, промышленные районы, спальные районы и рекреационные зоны) можно будет в дальнейшем совершенствовать как сами модели, так и сеть мониторинга загрязнений воздушного бассейна столицы.

Литература:

1. Ponomarev N.A., Elansky N.F., Zakharov V.I., Verevkin Y.M. Optimization of Pollutant Emissions for Air Quality Modeling in Moscow. // Processes in GeoMedia. 2020. Volume I. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-030-38177-6_16
2. Ponomarev N. A., Elansky N. F., Kirsanov A. A., Postilyakov O. V., Borovski A. N., Verevkin Y. M. Application of Atmospheric Chemical Transport Models to Validation of Pollutant Emissions in Moscow. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2020. Vol. 33. No. 4. pp. 362–371

Оксид углерода в атмосфере Московского мегаполиса: долговременные тенденции, влияние климатических факторов, атмосферный перенос, эмиссии

Ракиitin В.С.¹, Еланский Н.Ф.¹, Скороход А.И.¹, Кириллова Н.С.^{1,2}, Ракина А.В.¹, Штаб-кин Ю.А.¹, Казаков А.В.¹, Шилкин А.В.^{1,3}, Джолд А.В.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

³НПО "Тайфун", Обнинск, Россия

vadim@ifaran.ru

Ключевые слова: состав атмосферы, оксид углерода, атмосферная спектроскопия, мегаполис, тренды, эмиссии, климатический фактор, атмосферный перенос

Представлен комплексный анализ измерений общего содержания СО в Москве (пункт ИФА) и Московской области (пункт ЗНС, Звенигородская научная станция) с использованием спектроскопических данных ИФА РАН, спутниковой информации, данных автоматизированных станций сети Мосэкомониторинг, метеорологической информации о параметрах пограничного слоя атмосферы (ПСА) в Москве и окружающих регионах. Исследована долговременная изменчивость общего содержания (ОС) СО и метеопараметров, получены характеристики накопления загрязнений в штилевые дни в пограничном слое атмосферы, получены оценки интегральных эмиссий Москвы, согласующиеся с литературными данными.

Установлено убывание среднегодовых величин ОС СО в 2000-2018 гг. в Москве ($-2,6 \pm 0,5\%$ /год) и на ЗНС ($-1,1 \pm 0,5\%$ /год), здесь и далее приводятся оценки линейных трендов с указанием 95% доверительного интервала. Однако, скорость убывания в обоих пунктах в разные сезоны и периоды различна. После примерно 2007-2008 г. скорость убывания ОС СО уменьшилась в обоих пунктах. В период 2008-2018 гг. на ЗНС зафиксирован рост ОС СО в летние и осенние месяцы со скоростью около $0,7\%$ /год.

Установлено уменьшение скорости ветра в ПСА Москвы в разные периоды 2000-2018 гг. со скоростью $0,4-1,6\%$ /год (по данным станции аэрологического зондирования №27612, г. Долгопрудный). При этом в сельских районах Московской и Калужской областей не обнаружено статистически значимых изменений скорости ветра в ПСА. Повторяемость штилевых дней в Москве в период 2006-2017 гг. уменьшалась ($-6,7 \pm 4,8\%$ /год) при уменьшении антропогенной части содержания в этот же период ($-7,1 \pm 4,3\%$ /год). Полученные результаты свидетельствуют о росте влияния климатического (метеорологического) фактора на качество воздуха в Москве.

Систематизация по типам атмосферной циркуляции распределений ОС СО, полученных с использованием данных орбитального спектрометра высокого разрешения TROPOMI и методов траекторного анализа, позволила установить отсутствие выраженного шлейфа СО от Москвы; в то же время отчетливо заметен шлейф от Европы, достигающий ЕТР. Влияние переноса СО от Москвы заканчивается примерно на расстоянии около 200-400 км от Москвы (при анализе дней с выраженным направлением движения воздушных масс с юга на север); аналогичные результаты получены при расчете с помощью XTM GEOS-Chem отклика полей концентрации и ОС СО на эмиссии Москвы.

Использование новой кроссплатформенной базы данных для накопления долгосрочных измерений ультрафиолетовой радиации и содержания озона в атмосфере на основе наблюдений на спектрофотометре Брюэра

Савиных В.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

amita@ifaran.ru

Ключевые слова: *долгосрочные наблюдения озона, спектрофотометр Брюэра, мониторинг
восстановления озонового слоя, спектральная ультрафиолетовая радиация, кроссплатформенное программное обеспечение, O/PO Entity Framework Core, реляционные СУБД*

Сокращение выбросов отдельных озоноразрушающих веществ (ОРВ) ведёт к неравномерному восстановлению озонового слоя, т.к. на него также влияют выбросы ОРВ, которые не ограничены Монреальским протоколом. Поэтому сохраняется необходимость продолжения мониторинга общего содержания озона (ОСО) и ультрафиолетовой (УФ) радиации и обеспечения однородности полученных измерений по сравнению с данными предыдущих десятилетий. Сеть спектрофотометров Брюэра, действующая с начала 1980-х годов, является одной из старейших глобальных систем, которая предоставляет высокоточные данные ОСО и спектральной УФ радиации. В ИФА им. А.М. Обухова РАН разрабатывается кроссплатформенная база данных (БД) измерений ОСО и УФ радиации для использования с новым управляющим программным обеспечением (ПО) для спектрофотометров Брюэра. Данное ПО способно работать на компьютерах с современными многозадачными операционными системами (Windows, Linux, macOS) и одновременно имеет единую кодовую базу. БД реализована в виде разделяемой библиотеки на языке программирования C# и платформе .NET Core с использованием Entity Framework (EF) Core как инструмента объектно-реляционного отображения (О/РО). В качестве постоянного хранилища применяется легковесная встраиваемая реляционная СУБД SQLite. EF Core – это модуль О/РО, который позволяет приложениям .NET Core хранить данные в реляционных СУБД. С помощью EF Core доступ к данным осуществляется посредством модели. Модель состоит из классов сущностей и объекта контекста, который предоставляет сеанс с БД, позволяя запрашивать и сохранять данные. Разрабатываемое управляющее ПО Брюэра представляет данные в иерархической или реляционной форме, при этом данные рационализируются в отдельные классы сущностей. Центральный «корневой» класс сущностей является родителем для нескольких других дочерних классов – как отдельных сущностей, так и их коллекций. Каждая отдельная сущность имеет свой собственный набор элементов данных, которые могут быть любых типов. Все сущности отображаются в свои собственные таблицы БД с полями, соответствующими свойствам классов сущностей. Предлагаемая БД позволит поддерживать целостность и непротиворечивость измерений УФ радиации и ОСО на спектрофотометрах Брюэра глобальной сети.

Работа выполнена в ходе исследования № 0129-2019-0002.

Литература:

1. Price M.J. C# 8.0 and .NET Core 3.0, Fourth Edition. Birmingham: Packt Publishing, 2019. 818 p.
2. Freeman A. Pro Entity Framework Core 2 for ASP.NET Core MVC. NY: Apress, 2018. 676 p.
3. Kreibich J.A. Using SQLite. Sebastopol: O'Reilly Media, 2010. 530 p.
4. Savinykh V.V., Borovski A.N., Postylyakov O.V. Model of development of cross-platform software for ozone and ultraviolet radiation measurements on the example of Brewer Spectrophotometer // Proc. SPIE 11208, 2019. 112084A.

Перенос в арктическую атмосферу продуктов горения сибирских лесов

Ситнов С.А.¹, Мохов И.И.^{1,2}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

sitnov@ifaran.ru

Ключевые слова: Лесные пожары, черный углерод, монооксид углерода, Арктика, дальний перенос в атмосфере, атмосферное блокирование, валидация данных BC MERRA-2

Представляются результаты анализа переноса в арктическую атмосферу продуктов горения в связи с массовыми пожарами сибирских лесов в период 2000-2019 гг. Анализ характеристик лесных пожаров за последние 20 лет показал рост радиационной мощности среднего пожара, характеризующийся значимым линейным трендом 1.7 ± 1.0 %/год. Совместный анализ пожарной активности в сибирских лесах и аномалий содержания ВС (черного углерода) и CO, а также аэрозольной оптической толщины в арктической атмосфере свидетельствует, что экстремумам пожаров сопутствуют экстремумы содержания продуктов горения в атмосфере Арктики. Корреляция среднемесячных аномалий ВС с количеством пожаров достигает $r = 0.69$, будучи значимой на уровне $\alpha = 0.05$. С использованием соответствующей линейной регрессии получена оценка чувствительности межгодовых (внутригодовых) вариаций содержания ВС в арктической атмосфере к вариациям пожарной активности в лесах Восточной Сибири: $1.22 \cdot 10^{-8}$ ($5.03 \cdot 10^{-8}$) $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ / 1000 пожаров.

Анализ механизмов дальнего переноса продуктов горения в атмосфере Северной Евразии при массовых лесных пожарах в Сибири в 2000-2019 гг., выявил тесную связь аномалий регионального содержания в атмосфере продуктов горения с особенностями атмосферной циркуляции, характерными для различных типов атмосферного блокирования. В частности, дальний аномальный (с востока на запад) перенос продуктов горения в субполярных широтах Северной Евразии при лесных пожарах 2016 г. был обусловлен особенностями атмосферной циркуляции, характерными для атмосферного блокирования дипольного типа, тогда как интенсивный перенос продуктов горения в арктическую атмосферу при катастрофических сибирских пожарах 2019 г. - с атмосферным блокированием дипольного типа в июле и омега-блокированием в августе.

Валидация данных спутникового реанализа MERRA-2 для общего содержания ВС данными наземных измерений массовой концентрации ВС аэталометром в обсерватории Тикси в 2012 г. и 2019 г. обнаруживает высокую корреляцию вариаций локальной концентрации ВС и его интегрального содержания в атмосферном столбе в период прихода в Тикси воздушных масс, прошедших над районами интенсивных пожаров в Сибири.

Состав атмосферы в г. Москве в условиях мероприятий по нераспространению коронавирусной инфекции в марте–апреле 2020 г.

Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Губанова Д.П., Ракитин В.С., Белоусов В.А.,
Пономарев Н.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
askorokhod@mail.ru

Ключевые слова: Состав атмосферы, коронавирус, Москва, загрязнение атмосферы, газовые примеси, аэрозоли, эмиссии

Исследовано изменение состава атмосферы в г. Москве в условиях режима повышенной готовности, введенного в связи с угрозой распространения новой коронавирусной инфекции (2019-nCoV). Проведенное исследование основано на данных наблюдений газового и аэрозольного состава атмосферы, выполненных в ИФА им. А.М.Обухова РАН и на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг», результатах численного моделирования и данных спутниковых наблюдений.

С 30 марта 2020 г. Указами Президента РФ и мэра Москвы был введен режим нерабочих дней, который предусматривал фактическую приостановку деятельности предприятий общепита и досуга, значительное сокращение торговли, очного образования, работы многочисленных предприятий, не связанных с обеспечением городского хозяйства. В этот период, по данным Департамента транспорта г. Москвы, интенсивность автомобильного движения сократилась на 50-80 % по сравнению с тем же периодом прошлого года. Эта уникальная ситуация позволяет оценить влияние активности населения на состав и качество воздуха в мегаполисе, а также на эмиссии загрязняющих примесей.

Проведенный анализ показал, что после введения режима нерабочих дней наблюдалось заметное снижение концентраций именно тех газовых примесей, основным источником которых в мегаполисе считается автотранспорт. Снижение концентраций в нерабочую неделю достигало: для монооксида азота в 2,7 раза, для диоксида азота в 1,4 раза, для монооксида углерода в 1,2 раза в приземном воздухе и примерно столько же в толще атмосферы. Для концентраций диоксида углерода, метана, а также атмосферного аэрозоля существенных изменений в нерабочие недели не наблюдалось.

Проведено сравнение измеренных концентраций загрязняющих примесей с концентрациями, рассчитанными для того же периода при помощи региональной транспортно-химической модели SILAM, что позволило оценить снижение локальных выбросов в Московском регионе в условиях режима повышенной готовности. Также для оценки снижения антропогенной нагрузки на мегаполис и влияния дальнего переноса в этих условиях проведен анализ данных спутниковых спектрометров AIRS, MODIS и TROPOMI.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-05-00352 и 19-05-50088 и РНФ (проект №16-17-10275).

Восстановление аэрозольного отношения рассеяния при лидарном зондировании

Суханов А.Я., Бочковский Д.А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

sav@iao.ru

Ключевые слова: *лидарное зондирование, аэрозоль, отношение аэрозольного рассеяния, нейронные сети*

Для анализа аэрозольного наполнения атмосферы, изучения аэрозольной стратификации довольно часто применяются методы лидарного зондирования. Так на малой станции высотного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева проводятся регулярные измерения профиля отношения аэрозольного рассеяния до высот 40 км. В настоящее время для данных измерений используется два канала измерений на двух длинах волн 353 и 532 нм. В данной работе анализируется эффективность подхода, связанного с применением нейронных сетей для восстановления не только отношения рассеяния, но и аэрозольного рассеяния одновременно с использованием двух длин волн, ранее используемые методы рассматривали использование каждой длины волны отдельно. Технология нейронных сетей предполагает создание адекватных обучающих выборок на основе адекватных атмосферных моделей и проведение численного моделирования по переносу лазерного излучения. В докладе рассматривается процесс создания таких выборок, обучения нейронной сети и полученные на основе нейронной сети результаты по восстановлению отношения аэрозольного рассеяния и аэрозольного ослабления.

Экспериментальные расчеты загрязнения воздуха в Москве с имитационными эмиссиями с использованием химической

транспортной модели CHIMERE

Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Борисов Д.В.

Гидрометцентр России, Москва, Россия

shalygina@mecom.ru

Ключевые слова: химическая транспортная модель CHIMERE, эмиссии, ЕМЕП, COVID-19

В период пандемии COVID-19 снижение экономической активности привело к ослаблению влияния человека на окружающую среду. Уже в первую неделю карантина в Москве число поездок на личном транспорте сократилось почти на 40%. По данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» в апреле – в самых жестких карантинных условиях – содержание оксидов азота в воздухе Москвы уменьшилось почти на 50%, а взвешенных веществ PM10 сократилось на 23%. Сложнее установить количественные изменения объемов выбросов от различных антропогенных источников, обеспечивших значительное понижение уровня загрязнения воздуха. С использованием в качестве расчетного инструментария химическую транспортную модель CHIMERE-2,2 /COSMO – Ru2.2 с усвоением базовых эмиссий кадастра ЕМЕП выполнены почасовые расчеты концентраций приоритетных загрязняющих веществ в приземном воздухе Москвы в период март –июль 2020 г. по сценариям значительного сокращения эмиссий отраслевых источников (SNAP). Эксперименты проводились с вариациями транспортных эмиссий и выбросов предприятий теплоэнергетики. Установлены количественные показатели изменения уровня загрязнения основных веществ. В частности, при сокращении на 60% выбросов автотранспорта расчетные средние за месяц концентрации CO уменьшились на 18-32%, NO2 на 30-40%, PM10 на 13-17%. При сокращении на 50% эмиссий предприятий теплоэнергетики расчетные приземные концентрации CO не изменились, концентрации NO2 снизились менее чем на 1%. Максимальный эффект снижения выбросов обнаруживается в эпизодах неблагоприятных метеорологических условий.

Особенности сезонного хода эмиссии загрязняющих примесей кадастра ЕМЕР для расчётов химической транспортной модели CHIMERE в Московском регионе

Шалыгина И.Ю.¹, Кузнецова И.Н.¹, Борисов Д.В.¹, Нахаев М.И.¹, Лезина Е.А.²

¹Гидрометцентр России, Москва, Россия

²ГПБУ "Мосэкомониторинг"

irus_76@mail.ru

Ключевые слова: эмиссии ЕМЕР, химическая транспортная модель CHIMERE, прогноз концентраций загрязняющих примесей

Опыт использования в Московском регионе химических транспортных моделей (ХТМ) для расчетов концентраций загрязняющих примесей в приземном слое воздуха и их верификации с использованием данных мониторинга сети АСКЗА «Мосэкомониторинг» позволили установить, что погрешности расчетов ХТМ связаны с начальными данными. Неточности данных эмиссий вносят систематические погрешности в расчёты ХТМ. Технологическая линия расчетов концентрации загрязняющих примесей в московском регионе, реализованная в Гидрометцентре России, построенная на использовании модели атмосферы Cosmo-Ru и ХТМ CHIMERE с использованием кадастра эмиссии ЕМЕР.

Сравнения расчетов средних месячных наблюдаемых и расчётных концентраций CO, NO_x и PM₁₀ позволили установить несоответствие сезонного хода расчётных и наблюдаемых концентраций, что в первую очередь связано с модельным сезонным ходом эмиссии. В базовом кадастре эмиссий ЕМЕР содержатся годовые объёмы эмиссий отдельно по 11 источникам, для каждого из которых задается сезонный модельный ход. На основе открытых данных источников о сезонной изменчивости выбросов по отдельным источникам, удалось уточнить и скорректировать модельный сезонный ход эмиссий автотранспорта и предприятий теплоэнергетики в Москве. Эксперименты по коррекции модельных сезонных коэффициентов пересчёта годовых эмиссии загрязняющих веществ показали эффективность такого подхода.

Источники атмосферного метана в Арктике: наблюдения и численное моделирование

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Беликов И.Б., Панкратова Н.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
yuryshtabkin@gmail.com

Ключевые слова: метан, Арктика, дальний перенос, численное моделирование, количественные оценки, долговременные наблюдения, загрязнение атмосферы

Метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом в атмосфере после диоксида углерода, CO_2 . Для Арктики ограниченность данных по содержанию метана в приземном воздухе затрудняет проведение количественных оценок влияния эмиссий метана от важнейших региональных антропогенных и биогенных источников. Частично указанный пробел восполняется данными долгосрочных наблюдений на арктических и субарктических станциях. Начиная с 2005 года, по данным станционных наблюдений, наблюдается заметный рост приземной концентрации метана. Причины указанного роста остаются до конца не выяснены. В работе приводятся количественные оценки возможного вклада важнейших региональных источников эмиссий метана в наблюдаемую долгосрочную изменчивость содержания CH_4 в приземном воздухе.

Для анализа вариаций приземного содержания метана использовались данные наблюдений на фоновых станциях мониторинга состава атмосферного воздуха, а также численные расчеты, проводимые с помощью транспортно-химической модели GEOS-Chem, широко используемой в международном сообществе для расчетов полей химически активных и парниковых газов в атмосфере.

Сезонные вариации приземного содержания озона в Северной Евразии: наблюдения и численное моделирование

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

yuryshtabkin@gmail.com

Ключевые слова: приземный озон, антропогенное загрязнение, окислы азота, биогенные ЛОС, модель GEOS-Chem, региональный перенос

Исследуется влияние климатически значимых региональных источников эмиссий окислов азота ($\text{NO}_x \equiv \text{NO} + \text{NO}_2$), СО и биогенных летучих органических соединений (ЛОС) на фотохимическую генерацию приземного озона (O_3) в регионах Европы и Сибири. Расчеты чувствительности поля O_3 к величинам суммарных эмиссий предшественников озона выполнены с помощью глобальной транспортно-химической модели GEOS-Chem с использованием баз данных по антропогенным (EDGAR) и биогенным (MEGAN, GFED) эмиссиям за 2007–2014 гг. Величина фотохимической наработки озона в летние месяцы хорошо коррелирует с возрастом воздушной массы, устанавливаемым по отношению к суммарному реактивному азоту, при среднем вкладе региональных источников $\sim 10\text{--}15$ ppbv, что составляет 20–30 % от фоновой концентрации в средних широтах ($\sim 35\text{--}45$ ppbv). Полученные количественные оценки величины эффективности производства озона за летние месяцы указанного периода ($\sim 10\text{--}30$ мол. O_3 /мол. NO_x) находятся в хорошем соответствии с выводами фотохимической теории тропосферного озона для условий слабо загрязненного воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-35-20031).

Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации и региональный баланс тропосферного озона

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В., Васильева А.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

yuryshtabkin@gmail.com

Ключевые слова: приземный озон, антропогенное загрязнение, окислы азота, модель GEOS-Chem, дальний перенос, региональный бюджет озона

Влияние эмиссий фотохимически активных соединений в промышленных регионах на приповерхностный состав воздуха нелокально и во многих случаях прослеживается в трансконтинентальном масштабе. Примерами этого эффекта являются крупные шлейфы загрязненного воздуха, определяемые по наблюдениям на фоновых станциях и расчетам с помощью транспортно-химических моделей. В данной работе для оценки влияния антропогенных и биогенных выбросов в Европе, на Европейской территории России (ЕТР) и Сибири на общее образование озона с учетом общих нелинейных свойств системы $O_3 - NO_x - CO - \text{ЛОС}$ использовалась транспортно-химическая модель GEOS-Chem. Показано, что увеличение скорости образования озона за счет региональных антропогенных выбросов NO_x приводит к значительному (до 20 ppbv) увеличению приземных концентраций озона в средних широтах, прослеживаемых до 120Е. Преобладающая роль дальнего переноса в сравнении с региональными фотохимическими источниками озона была определена для большей части ЕТР и Сибири.

Также была проведена количественная оценка баланса озона для Европы, ЕТР и Сибири. Годовая общая масса озона в нижней тропосфере (от поверхности до 800 гПа) в зависимости от региона составляет 1,5–2,4 Тг в теплый период (1 апреля - 30 сентября) и 1,3–2,2 Тг в холодный период (1 октября - 31 марта). Производство озона в химических процессах с высокой степенью точности (> 99%) уравнивается общим переносом в атмосфере, в то время как абсолютные колебания общего содержания O_3 не превышают 0,5 Тг/год в Европе и 0,4 Тг/год в Сибири.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-35-20031) и частичной поддержке РНФ (грант №20-17-00200, расчеты балансовых соотношений для озона).

Тестирование модели IRI на данных измерения электронной концентрации ионосферы спутниками SWARM в 2014 г.

Юргайтис Д.Ю.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет,
Москва, Россия*

d.yurgaytis@gmail.com

Ключевые слова: ионосфера, модели ионосферы, электронная концентрация

В ходе работы проведено сравнение электронной концентрации, наблюдаемой in-situ контактным способом на спутниках ESA (European Space Agency) SWARM и соответствующих им результатов расчетов по современной эмпирической модели IRI-2016 в различных геомагнитных условиях (слабо возмущенных и сильно возмущенных) периода максимума солнечной активности 2014 г. для разных широт - проведенные исследования позволили судить об особенностях работы модели в различных гео- и гелиофизических условиях для разных широт в фазе максимума 24-го цикла солнечной активности.

Выполненный в работе анализ показывает рост систематической ошибки модели для возмущенных геомагнитных условий почти в 1,5 раза относительно спокойных. Дополнительные исследования показали зависимость систематической ошибки от широты. Таким образом, получено, что модель IRI не очень хорошо описывает экваториальную аномалию и область высоких широт. Так, для средних широт возрастание ошибки в возмущенных условиях составляет более 1.5 раз, для области высоких широт эта величина составляет 1.3 раза, а для экваториальных - в 1.65 раза для данных 2014г. Одновременно, модель IRI-2016 описывает поведение электронной концентрации в средних широтах в невозмущенных условиях 2014г. со средней годовой ошибкой 27%. Это можно считать удовлетворительным для ряда приложений.

Проведен детальный анализ статистики выделенного в экспериментальных данных шума (вариации электронной концентрации Ne относительно сглаженного регулярного уровня). Наблюдается изменение дисперсии шума на различных широтах, что также отражается в росте ошибки в случаях возмущенных гео- гелиофизических условий. Установлено отсутствие значимой корреляции между величиной дисперсии шума измерений электронной концентрации и магнитными геофизическими индексами Dst и AE. В тоже время, наши исследования показывают наличие значимой корреляции вариаций (дисперсии) электронной концентрации с планетарным индексом Kp.

Электричество среднеширотного атмосферного пограничного слоя: результаты синхронных наземных и аэростатных наблюдений

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Климанова Е.В., Прохорчук А.А., Козьмина А.С., Гурьев А.В.

*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок, Россия
anisimov@borok.yar.ru*

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, атмосферное электричество, аэростатные наблюдения, высотные аэроэлектрические профили

Исследования электрических процессов в атмосферном пограничном слое (АПС) нижнем атмосферном участке глобальной электрической цепи (ГЭЦ), включая разработку численных моделей, базируются преимущественно на результатах наземных наблюдений. Неоднозначность интерпретации результатов натуральных наземных наблюдений обусловлена сложностью турбулентной динамики АПС, пространственной неоднородностью объемного заряда и электрической проводимости, а также нелокальным характером электрического поля [1]. С целью проверки существующих теоретических оценок и установления закономерностей формирования вертикальных распределений концентрации аэрозольных частиц, объемной активности радона, электрической проводимости, напряженности атмосферного электрического тока и плотности вертикального тока проведены высотные аэрофизические наблюдения с использованием привязного аэростата [2]. Зондирование высоты охватывало приблизительно 0,5 км нижней атмосферы и сопровождалось одновременными наземными измерениями. Метод синхронных разнесенных наблюдений позволил детально проанализировать пространственные и временные изменения электрических величин АПС. В результате последовательных подъемов и спусков, а также удерживания платформы на определенных высотах, обнаружены долгоживущие слои объемного заряда, оценена скорость изменения заряда в нижней атмосфере. Определено, что плотность заряда легких ионов заключена в диапазоне от -20 до 30 пКл/см³, достигая наибольших значений, за редкими исключениями, непосредственно у земной поверхности. Проанализированы характерные особенности высотных профилей напряженности электрического поля, концентрации аэрозольных частиц и объемной активности радона. На основании результатов высотного зондирования количественно определены электрическое сопротивление столба, потенциал и электродвижущая сила, действующая в АПС в условиях хорошей погоды. Полученные оценки показывают значительный вклад АПС в процессы формирования ГЭЦ.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант №16-17-10209, РФФИ (аэростатные наблюдения), грант №18-05-00233 (полевые наземные наблюдения) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023 (обсерваторские наблюдения).

Литература:

1. Anisimov, S.V. et al. Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // Atmos. Res. 2020. V. 244. 105035. DOI: 0.1016/j.atmosres.2020.105035.
2. Анисимов и др. Электрическое состояние приземной атмосферы по результатам аэростатных наблюдений // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481, № 2. С. 197–202.

Электрическая стратификация конвективного атмосферного пограничного слоя средних широт: результаты численного моделирования и натурных наблюдений

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Афиногенов К.В.

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок, Россия

svga@borok.yar.ru

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, атмосферное электричество, вихреразрешающее моделирование, натурные наблюдения, высотные профили

Атмосферный пограничный слой (АПС), осуществляющий динамическое взаимодействие, а также обмен энергией и веществом между земной поверхностью и атмосферой, обладает электрической стратификацией, проявляющейся в формировании чередующихся долгоживущих слоев объемного заряда и ассоциируемого с ними электрического поля [1].

В докладе представлены результаты исследования электрического состояния конвективного АПС средних широт. Основу численной модели составляет разностное решение фильтрованных уравнений Навье-Стокса в анэластическом приближении вместе с транспортным уравнением для фильтрованной температуры (вихреразрешающее моделирование) с динамическим замыканием подсеточных масштабов. Энергетический каскад в инерционном интервале моделируется с помощью метода случайных Фурье-мод, генерирующего кинематическое поле скоростей турбулентного течения, локальный перенос турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) по спектру в котором согласован с полной подсеточной ТКЭ вихреразрешающей модели. Статистика скаляра, используемая в расчете высотных профилей концентраций атмосферных ионов, аэрозольных частиц, изотопов радона вместе с короткоживущими дочерними продуктами, которые являются основными ионизаторами в АПС над сушей, определяется посредством моделирования ансамбля траекторий условных лагранжевых частиц, кинематика которых определяется суперпозицией интерполированного на сетке турбулентного поля скоростей энергонесущих вихрей и стохастического бездивергентного поля кинематической подсеточной модели, а также лагранжевой стохастической модели, применяемой в нижней свободной атмосфере [2, 3].

Высотное распределение электрических переменных АПС и нижней свободной слабоустойчивой атмосферы без облаков исследуется в численной модели в зависимости от поверхностного турбулентного потока тепла, скорости геострофического ветра, высоты слоя конвективного перемешивания, ионосферного потенциала и скорости ионообразования, меняющейся в зависимости от геомагнитной широты и фазы цикла солнечной активности, а также скорости эсхалляции радиоактивных газов. Результаты моделирования сравниваются с данными натурных наблюдений, полученными с использованием привязного аэростата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 16-17-10209).

Литература:

1. Анисимов и др. Формирование электрически активных слоев атмосферы с температурной инверсией // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 442–452.
2. Anisimov, S.V. et al. Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer // Atmos. Res. 2017. V. 194. P. 119–129.
3. Anisimov S.V. et al. Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // Boundary-Layer Meteorol. 2018. V. 167. P. 327–348.

Исследование вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя над болотами Западной Сибири

Артамонов А.Ю.¹, Репина И.А.^{1,2}, Степаненко В.М.², Варенцов М.И.^{2,1},
Варенцов А.И.², Куксова Н.Е.²

¹Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

sailer@ifaran.ru

Ключевые слова: БПЛА, атмосферный пограничный слой, инверсии, температура подстилающей поверхности

В работе представлены результаты исследования структуры и динамики атмосферного пограничного слоя над заболоченной местностью в Западной Сибири на базе полевого стационара Мухрино в полевые сезоны 2019 и 2020 года. Для измерений использовался комплекс для вертикального зондирования атмосферы, разработанный на базе беспилотного летательного аппарата. Измерялись профили температуры, скорости ветра и влажности, а также температурная структура подстилающей поверхности. Результаты измерения профилей температуры сравнивались с дистанционными наблюдениями с использованием температурного профилемера. Исследована суточная динамика состояния атмосферы, формирование ночных инверсий. Измерения сопровождались приземными исследованиями характеристик радиационного баланса и турбулентного энергообмена, а также потоков углекислого газа и метана в системе атмосфера-подстилающая поверхность. Пространственное распределение температуры подстилающей поверхности показала сильные температурные контрасты, интенсивность которых зависит от степени прогрева поверхности и имеет суточный ход. Также отмечены значительные контрасты в значениях альбедо поверхности. В рамках работы проведена верификация методов измерения структуры и динамики атмосферного пограничного слоя с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-60126- Арктика.

Температурно-ветровое зондирование пограничного слоя атмосферы в прибрежной зоне Байкала

Банах В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

banakh@iao.ru

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, устойчивая стратификация, турбулентность, низкоуровневые течения, внутренние волны, ветровой лидар, температурный профилометр

Представлены результаты экспериментальных исследований пограничного слоя атмосферы в прибрежной зоне озера Байкал с использованием когерентного доплеровского ветрового лидара и температурного профилометра. Получены двумерные по высоте и времени распределения скорости ветра, температуры и числа Ричардсона. Установлено, что во время эксперимента с 6-го по 23-е августа 2018 года в регионе измерений в пограничном слое круглосуточно реализовались условия устойчивой термической стратификации с образованием низкоуровневых струйных течений как в ночное, так и в дневное время. Высотно временные распределения числа Ричардсона имеют слоистую структуру. Слои с числами Ричардсона, превышающими критическое значение, перемежаются со слоями, где число Ричардсона меньше критического. Получены двумерные по высоте и времени распределения компонент скорости ветра, температуры и параметров, характеризующих ветровую турбулентность. Определены параметры атмосферных волн, возникающих в устойчивом пограничном слое. Проводится анализ вариаций скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, дисперсии флуктуаций радиальной скорости и внешнего масштаба турбулентности во время образования в пограничном слое струйных течений и внутренних атмосферных волн и их связи с вариациями числа Ричардсона.

Квадрокоптер как инструмент для мониторинга и исследования пограничного слоя атмосферы

Варенцов М.И.^{1,2}, Артамонов А.Ю.², Репина И.А.^{2,1}, Константинов П.И.¹, Степаненко В.М.¹,
Локощенко М.А.¹, Богомолов В.Ю.³, Куксова Н.Е.¹, Варенцов А.И.¹, Марчук Е.А.^{1,2}, Шестакова
А.А.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
mvar91@gmail.com

Ключевые слова: квадрокоптер, беспилотный летательный аппарат, пограничный слой атмосферы, городской остров тепла, полынья, инверсия

Доклад посвящен методам применения мультироторных беспилотных летательных аппаратов (квадрокоптеров) для метеорологических измерений в пограничном слое атмосферы. Рассмотрен опыт авторского коллектива по использованию измерительного комплекса, созданного на базе популярной модели квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro и метеорологических датчиков iMet-XF и iMet-XQ2. Измерительный комплекс использовался в серии полевых экспериментов, направленных на исследование структуры пограничного слоя атмосферы над неоднородными ландшафтами – в том числе, в рамках задач изучения эффекта острова тепла в городах Арктической зоны РФ, конвективных пограничных слоев над незамерзающими полыньями и приземных температурных инверсий. Сценарии использования квадрокоптеров в подобных исследованиях включали в себя измерение вертикальных профилей температуры, влажности и скорости ветра; горизонтальные разрезы над неоднородной поверхностью; использования квадрокоптера режиме «летающей метеостанции» для получения временных рядов метеовеличин в труднодоступной точке (например, внутри конвективного пограничного слоя над полыней). Для оценки точности получаемых данных проведено их сравнение с другими видами измерений. Результаты вертикального зондирования с помощью квадрокоптера сравнивались с наблюдениями высотной метеорологической мачты в Обнинске, измерениями температурных профиломеров МТП-5, результатами ветрового акустического (содарного) зондирования атмосферы в метеорологической обсерватории МГУ и шаропилотного ветрового зондирования. Дополнительно проведены эксперименты, в ходе которых квадрокоптер с датчиками зависал рядом с высокочастотным акустическим анемометром. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о надежности предложенных методов использования квадрокоптера для метеорологических измерений, в том числе в суровых зимних условиях, о достаточно высокой точности получаемых данных и о перспективах дальнейшего развития данного направления исследований.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проекты № 18-05-60126, 18-05-80065 и 20-55-71004.

О двух ярусной модели конвективного поверхностного слоя и модификации теории подобия Монина-Обухова

Вульфсон А.Н.^{1,2}, Николаев П.В.³

¹Институт водных проблем Российской академии наук.

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия
longines1812@yandex.ru

Ключевые слова: теория подобия Монина-Обухова, двухярусная модель конвективного поверхностного слоя, метод альтернативных переменных

Предложена двухярусная модель конвективного поверхностного слоя. Граница между ярусами не содержит переходной зоны и считается плоской. Эта плоскость отделяет нижний динамический ярус, прилегающий к подстилающей поверхности от верхнего яруса вынужденной конвекции. Аппроксимации турбулентных моментов построены отдельно для каждого яруса в форме усеченных разложений в ряд по модифицированной высоте. При этом первые члены ярусных разложений соответствуют динамическим и свободно конвективным пределам теории Монина-Обухова, см. [1–3]. Для ярусных аппроксимаций турбулентных моментов условия непрерывности и гладкого сшивания на плоской границе позволяют исключить большую часть неопределенных параметров. Достоинством подхода является достаточно высокая универсальность, позволяющая построить аппроксимацию для любого турбулентного момента конвективного поверхностного слоя. Недостатком подхода является не единственность разложений и реализаций условий гладкого сшивания, см. [1,2] и [3]. В рамках теории подобия предложен метод альтернативных переменных, использующий плавучесть вместо флуктуации температуры, см. [1–3].

Литература:

1. Вульфсон А.Н., Николаев П.В. //Известия. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. №5. С. 556–565.
2. Vulfson A.N., Nikolaev P.V. //J. Phys. Conf. Ser. 2019. P 012019
3. Vulfson A.N., Nikolaev P.V. // Springer Nature Switzerland AG 2019 V.I. Karev et al. (Eds.): Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes, SPEES, 2019. P. 359–367.

Исследование динамики турбулентности в городских условиях с использованием измерений на микрометеорологической мачте

Дрозд И.Д.¹, Гавриков А.В.², Степаненко В.М.^{1,3}, Репина И.А.^{4,3,1}, Артамонов А.Ю.⁴, Пашкин А.Д.⁴, Варенцов М.И.^{1,3,4}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

³Московский центр фундаментальной и прикладной математики

⁴Институт Физики Атмосферы им. А.М. Обухова РАН

drozdil.msu@gmail.com

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, теория подобия Монина-Обухова, микрометеорологические измерения, городская метеорология

Традиционно применяемые в атмосферном моделировании, энергобалансовых и биогеохимических расчетах параметризации основаны на выводах теории подобия Монина-Обухова, которая предполагает подстилающую поверхность, обладающую однородным горизонтальным распределением аэродинамической и температурной шероховатости. Но поверхностные неоднородности, в частности городская застройка, могут приводить к формированию турбулентных микромасштабных и когерентных циркуляций, которые влияют на структуру атмосферного пограничного слоя (АПС) и взаимодействие атмосферы с поверхностью. Целью изучения турбулентных процессов в городской среде является понимание физических механизмов, которые управляют обменом импульса, тепла и массы между городской поверхностью и атмосферой и таким образом энергетическим балансом деятельного слоя. Высокочастотные микрометеорологические измерения позволяют производить оценки воздействия городской застройки на ветровой и температурный режим территории, расчет энергопотребления зданий, определение путей распространения загрязняющих веществ от городских источников, и, в конечном счете, полезны для задач городского планирования. Для анализа динамики атмосферной турбулентности в городских условиях используются данные, полученные на трех уровнях измерений на микрометеорологической мачте высотой 21 м, установленной на территории метеорологической обсерватории МГУ [1]. Окружающая измерительный комплекс местность представляется собой пример окраинного городского ландшафта с разреженной застройкой. Такое расположение позволяет не только оценить статистические характеристики турбулентности в неоднородном ландшафте (в том числе при различных направлениях ветра), но и сопоставить два подхода к оценке турбулентных потоков тепла с поверхности: метод теплового баланса (реализованный с использованием измерений температуры почвы и радиационного баланса) и пульсационный метод при юго-западном направлении ветра.

Литература:

1. Артамонов А. Ю., Варенцов М. И., Гавриков А. В., Пашкин А. Д., Репина И. А., Степаненко В. М. Микрометеорологическая мачта в МО МГУ. В сб. Эколого-климатические характеристики Москвы в 2018 г. М.: МАКС Пресс, 2019.

О влиянии внутренних гравитационных волн разных типов на турбулентные характеристики в атмосферном пограничном слое

Зайцева Д.В.¹, Каллистратова М.А.¹, Люлюкин В.С.¹, Кузнецов Р.Д.^{1,2}, Кузнецов Д.Д.¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Финский метеорологический институт, Хельсинки, Финляндия

zaycevad@gmail.com

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, гравитационно-сдвиговые волны, волны плавучести, турбулентность

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) часто регистрируются в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (УПС). ВГВ часто разделяют на типы по механизму их генерации, к примеру : гравитационно-сдвиговые волны (ГСВ) и бегущие волны плавучести (БВП). Численные, лабораторные и натурные эксперименты дают основание полагать, что ВГВ оказывают влияние на интенсивность турбулентности в УПС. Однако, до сих пор нет общепринятого мнения о том, в какой степени ГСВ и БВП влияют на обменные процессы в УПС.

В этой работе мы анализировали эпизоды волновой активности, которые были зарегистрированы при помощи акустического локатора (содара) в пригородной местности в Московской области. Разделение волновых эпизодов на типы производилось по их вертикальной структуре (форме на содарных эхограммах).

Анализ измерений содара в 2008-2015 гг. показал, что в среднем ГСВ наблюдаются в 30% дней вне зависимости от сезона. БВП в основном наблюдаются в среднем в 4-8% дней в период с апреля по август и ещё реже в другие месяцы.

Для наиболее чётких эпизодов ВГВ по данным сверхзвукового термоанемометра, расположенного на высоте 56 метров, были рассчитаны турбулентные потоки тепла, импульса, а также ТКЕ. Было обнаружено, что БВП чаще приводили к заметным всплескам турбулентности, а в некоторых случаях и к ослаблению статической устойчивости. В большинстве случаев прохождение цугов ГСВ либо не оказывало влияния, либо оказывало незначительное влияние на измеренные потоки и ТКЕ. ВГВ типа ГСВ, регистрируемые содаром, чаще всего имели нижнюю границу выше 56 метров, что, по видимому, не позволяло зарегистрировать эти волны при помощи анемометра.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-01008).

**Использование беспилотного летательного аппарата
для исследования альbedo снежно-ледовых поверхностей**
Иванов Б.В.^{1,2,3}, Прохорова У.В.^{1,3}, Курапов М.В.¹, Журавский Д.М.¹, Уразгильдеева А.В.^{2,1},
Сыроветников С.С.¹, Безгрешнов А.М.¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург,
Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

B_ivanov@aaari.ru

Ключевые слова: альbedo льда и снега, БПЛА, радиационный баланс

Приводятся результаты использования БПЛА (квадрокоптер) для изучения альbedo естественных и искусственных снежно-ледовых поверхностей. Объектами исследований в Антарктиде являлись: ледниковый купол, шельфовый ледник, эпишельфовые озера, припай, взлетная посадочная полоса (ВПП) ледового аэродрома. Районы исследований – станции Прогресс, Новолазаревская, Молодежная. В Арктике исследования проводились на архипелаге Шпицберген (ледник Альдегонда, краевая зона ледника Эсмарк). Для наблюдений использовался специальный измерительный комплекс, разработанный в ААНИИ, на базе новейших микропроцессорных контролеров и фотометра LI-190SA (фирма *LICOR*, США), работающего в диапазоне длин волн 400–700 нм. При совместном анализе данных фотометра и камеры использовалась методика, разработанная в ААНИИ [1]. На методику получен патент РФ установленного образца. Для верификации результатов дистанционных наблюдений (БПЛА) на выбранных участках поверхностей устанавливалась актинометрическая установка, включающая аналогичные средства измерений (фотометры *LICOR*), регистрирующие приходящую и отраженную солнечную радиацию. Преимущество отдавалась наблюдениям, выполненным либо в абсолютно ясную погоду, либо при 100% сплошной облачности. На каждом выбранном полигоне (профиле) производились наблюдения на высотах: 2, 5, 10, 20, 50 м над уровнем поверхности. Поскольку использовались, практически безинерционные датчики, полет коптера осуществлялся при постоянной скорости и неизменной дискретности наблюдений. Особое внимание уделялось естественным поверхностям, включающим торосы, снежницы, ледниковые трещины, переходные зоны «оазис – ледник», а также искусственным покрытиям, таким, как ВПП [2–4].

Исследования выполнены в рамках плановой тематики ЦНТП Росгидромета (проект 24, тема 5.1.4.; проект 27, тема 5.2), при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-00471 и логистической поддержке 63, 64, 65 Российской Антарктической экспедиции и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген.

Литература:

1. Журавский Д.М. и др. Способ дистанционной оценки альbedo... Исследования Земли из Космоса. 2018, №1, С. 52–59.
2. Журавский Д.М. и др. Полевые испытания методики фотограмметрической оценки альbedo... Исследования Земли из Космоса. 2019, №4, С. 18–28.
3. Фролов И.Е. и др. Трансарктика 2019. Проблемы Арктики и Антарктики. 2019, т. 65, №3, С. 255–274.
4. Иванов Б.В. и др. Особенности турбулентного теплообмена... Проблемы Арктики и Антарктики. 2020, т. 66(3), С. 364–380.

Исследование влияния Санкт-Петербурга на распределение приземной температуры и осадков по данным многолетних измерений

Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г.

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия
katur.job@mail.ru

Ключевые слова: тепловое возмущение мегаполиса, антропогенное воздействие, пространственная интерполяция данных наблюдений, градиентный бустинг, распределение количества осадков

С развитием вычислительной техники и появлением спутниковой метеорологии появились новые подходы к исследованию особого теплового, влажностного и ветрового режимов мегаполиса. Тем не менее, исследование ОТ по данным станционных измерений, является важным этапом на пути создания адекватной гидродинамической модели прогноза погоды, поскольку результаты полученные входе такого исследования применимы как при валидации прогностических полей, так и при задании конфигурации модели.

Температура. Неоднородности в поле температуры на территории города могут возникать не только в результате антропогенного воздействия, но и по естественным причинам, что усложняет проблему выделения из множества факторов, определяющих пространственные изменения температуры воздуха, воздействия именно городской среды. Для исследования ОТ были проанализированы срочные данные с 15 метеорологических станций Ленинградской области помимо Санкт-Петербурга. Было выявлено наличие теплового возмущения, количественно согласующееся с исследованиями предыдущих лет. Для установления преобладающего воздействия, вызвавшего рост температуры, были использованы две методики оценки нарушений естественного климатического режима: метод разностей и полужемпирическая модель интерполяции [1]. Наличие двух методик, позволило выработать комбинированный критерий оценки интенсивности ОТ по данным многолетних измерений, компенсирующий недостаток метода разностей. Введение комбинированного критерия позволило отфильтровать микроклиматические колебания температуры воздуха и задействовать все имеющиеся данные с пригородных станций для учета их вклада в среднюю фоновую температуру за пределами мегаполиса. В результате исследования полученные количественные оценки антропогенного теплового возмущения, на основании которых найдены временные периоды ярко выраженного проявления феномена ОТ: позднелесный и ранневесенний периоды.

Осадки. Помимо воздействия мегаполиса на температуру воздуха, большой город также оказывает влияние на распределение количества осадков на близлежащих территориях. Согласно [2], увеличение количества осадков может наблюдаться на подветренной стороне города, на расстоянии 20-40 км, за счет конвективных процессов над мегаполисом, поднимающих водяной пар и ядра конденсации на высоту, достаточную для достижения каплями размеров, при которых происходит их выпадение на землю, и смещения полувившихся масс под воздействием основного переноса. Для проверки данной гипотезы, была проведена процедура восстановления данных о суточных суммах осадков на выбранных станциях методом градиентного бустинга. Были построены графики временного хода разностей годовых сумм осадков между центром мегаполиса и пригородной станцией. При рассмотрении пар станций расположенных по направлению переноса (с запада на восток), наблюдается рост количества осадков в подветренной по отношению к Санкт-Петербургу 50-километровой зоне, и их спад при удалении на восток от центра мегаполиса на расстояние более 100 км.

Литература:

1. Менжулин Г.В., Павловский А.А. Комплексная методика расчета и оценки нарушений естественного климатического режима в мегаполисе Санкт-Петербург // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2016. № 43. С. 154–173.
2. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 360 с.

Содарные наблюдения бризовой циркуляции в прибрежной зоне Черного моря

Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Кузнецов Д.Д., Зайцева Д.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
lyulyukin@ifaran.ru

Ключевые слова: бризовая циркуляция, содар, атмосферный пограничный слой, волны Кельвина-Гельмгольца, Черное море

В работе представлены результаты исследования бризовой циркуляции и вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя атмосферы (АПС) в северной части Черного моря, проведенного во время краткосрочных экспедиций в июне 2015 г., октябре 2016 г. и октябре 2018 г. Измерения проводились на стационарной океанографической платформе, расположенной в 450 м от южного побережья Крымского полуострова (44,39° с.ш., 33,99° с.ш.). Минисодар высокого разрешения Латан-3М (Kouznetsov, 2009) служил основным измерительным прибором. Дополнительные измерения проводились с помощью температурного профиломера, ультразвуковых термометров-анемометров, радиометров и автоматических метеостанций.

При ясной погоде наблюдался выраженный суточный цикл метеорологических параметров. Особенностью ветров в исследуемом районе была разница около 90 ° между ночным и дневным направлением ветра вблизи поверхности. Основное направление дневного ветра на всех высотах было с юго-западного сектора. Ночной ветер дул не с противоположного направления, а с северо-восточного сектора; и редко из северо-западного сектора. Ночной ветер в основном определялся стоковым воздушным потоком со склонов прибрежного хребта. Изменение ветра с высотой было выражено не значительно, по сравнению с чистой бризовой циркуляцией. Возвратный поток редко наблюдался на высоте 200–300 м в ночное время.

На содарных эхограммах были выявлены эпизоды волновой активности в АПС над прибрежной зоной (Lyulyukin et al, 2019). Короткие цуги валов Кельвина-Гельмгольца наблюдались, как правило, на рассвете в верхней части берегового потока морского бриза (то есть на высотах, где скорость ветра падала с высотой). Периоды валов составляли 2–4 мин. В некоторых случаях валы с противоположным наклоном и периодами 7–8 мин наблюдались также в нижней части возвратного потока, в слое с убывающей скоростью ветра.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта 19-05-01008.

Литература:

1. Kouznetsov, R.D. The multi-frequency sodar with high temporal resolution // Meteorol. Z. — 2009. — 18. — p. 169–173.
2. Lyulyukin, V., M. Kallistratova, D. Zaitseva, D. Kuznetsov, A. Artamonov, I. Repina, I. Petenko, R. Kouznetsov, A. Pashkin. Sodar Observation of the ABL Structure and Waves over the Black Sea Offshore Site // Atmosphere. — 2019. — 10. — p. 811.

Прямое численно моделирование устойчиво стратифицированного турбулентного течения Куэтта

Мортиков Е.В.¹, Глазунов А.В.^{2,1}, Лыкозов В.Н.^{2,1}

¹Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

evgeny.mortikov@gmail.com

Ключевые слова: прямое численное моделирование турбулентности, устойчивая стратификация, перемежаемость, течение Куэтта

В докладе представлены результаты прямого численного моделирования плоскопараллельного турбулентного течения Куэтта при устойчивой стратификации в широком интервале значений чисел Рейнольдса и Ричардсона. Расчеты свидетельствуют о применимости теории быстрых искажений (RDT — Rapid Distortion Theory) для параметризаций тензора корреляций «давление-скорости деформаций» для слабо устойчивой стратификации. При сильной устойчивости наблюдается переход к режиму выраженной перемежаемости, в котором локализованные по пространству полосы турбулентного и ламинарного течения чередуются в поперечном к потоку направлении. Турбулентность в данной форме может поддерживаться при большей устойчивости, чем это считалось ранее. Наблюдаемое усиление переноса кинетической энергии пульсаций скорости в центр канала обеспечивает поддержание турбулентности и связано с формированием вторичных крупных вихрей.

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер гранта 20-05-00776).

Экспериментальные исследования характеристик атмосферной турбулентности в городском каньоне

Пашкин А.Д.^{1,2}, Репина И.А.^{1,2}, Степаненко В.М.², Богомолов В.Ю.^{3,2},
Смирнов С.В.³, Тельминов А.Е.³

¹*Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*
artem128@tut.by

Ключевые слова: турбулентность, неоднородная поверхность, статистические моменты

Для математического моделирования климата и численного прогноза погоды необходима информация о турбулентных потоках тепла и импульса между атмосферой и подстилающей поверхностью. Авторы предполагают, что в однотипных неоднородных ландшафтах (например, в каньонах) существуют универсальные формы зависимостей между статистическими моментами, в которых безразмерные константы могут быть связаны с геометрическими параметрами конкретной местности. Обнаружение таких зависимостей будет способствовать разработке новых методов параметризации обмена между неоднородной поверхностью и атмосферой импульсом и скалярными характеристиками.

В настоящей работе представлены некоторые результаты эксперимента, в рамках которого проводится всесезонный мониторинг временной изменчивости и пространственной структуры атмосферной турбулентности в условиях, приближенных к условиям городского каньона. Измерения проводятся на базе геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН, г. Томск. В измерительную схему входит пять акустических анемометров АМК-03 совместного производства ИМКЭС СО РАН и ООО "Сибаналитприбор" (Россия). Приборы позволяют измерять пульсации трех компонент скорости ветра и температуры с частотой до 80 Гц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ 20-05-00834 и проекта № IX.138.2.3 (государственное задание ИМКЭС СО РАН).

Метеорологический беспилотный летательный комплекс мультироторного типа и его использование для мониторинга атмосферы

Попов Ю.Б.¹, Карпушин П.А.¹, Красненко Н.П.^{1,2}, Кураков С.А.², Раков А.С.²

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
popovyub@mail.ru

Ключевые слова: Беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, атмосферный пограничный слой, верификация, данные дистанционного зондирования.

В последнее время одним из быстро развивающихся научных направлений в исследованиях атмосферного пограничного слоя стало использование беспилотных летательных аппаратов. БПЛА (дроны) могут выполнять геофизические и метеорологические задачи, в частности, измерения параметров состояния атмосферы. Для решения задач в области метеорологии, в частности, для измерения вертикальных профилей метеопараметров, наиболее перспективным является применение БПЛА на базе мультироторных аэромобильных платформ (МАП или мультикоптеры). Данный вид БПЛА является универсальной несущей платформой с широким спектром применения. Высокая стабильность в полете, устойчивость к ветровым нагрузкам, наличие программируемых бортовых навигационных устройств - позволяют использовать данный тип БПЛА в широком диапазоне метеорологических условий, в любое время суток, в режиме ручного управления и автономного полета. Оснащение МАП блоком метеодатчиков (БИМ), позволяет проводить контактные измерения вертикального профиля метеорологических параметров в атмосферном пограничном слое (АПС) при каждом подъеме и спуске аппарата. Актуальность этой задачи обусловлена тем, что данные дистанционного зондирования атмосферы всё больше вовлекаются, в процесс прогнозирования погоды. Обычно верификация данных дистанционного зондирования выполняется с помощью контактных методов, а именно - по данным аэрологического зондирования. С этой точки зрения, БПЛА является универсальным аппаратом, который может быть полезен для получения данных о состоянии атмосферы над территорией между аэрологическими станциями, в т.ч. числе в труднодоступных районах. Комплектация БПЛА датчиками различного назначения позволяет обеспечить многоплановые измерения и быструю перенастройку платформу под разные задачи. Развитие подобных контактных технологий позволяет не только получить значительный объем данных, но и решать задачи фундаментальных исследований атмосферы на качественно новом уровне. Данные от МАП могут быть использованы как самостоятельно, в качестве альтернативы аэрологическим измерениям, либо в комплексе с ними. В 2019 г. в ИМКЭС СО РАН г.Томск, на основе разработанной портативной автоматической электронной метеостанции, установленной на гексакоптере DJI S900 и квадрокоптере Walkera Voyager 3, были реализованы макеты беспилотных измерителей метеопараметров атмосферы, а также проведены их испытания. Полученные полетные данные позволяют оценить достижимую высоту измерений с помощью использованных БПЛА, не менее 3 км. МАП может быть оперативно запущен несколько раз по заданной трассе, что позволяет отслеживать динамику измеряемых профилей метеопараметров. По результатам комплексных экспериментов проведены сравнения измерений температурного профиля в атмосфере с помощью МАП и температурного профилемера МТР-5 при различных стратификациях атмосферы. Измерения получены 30.03.2019, 16.05.2019 и 20.05.2019. В докладе приводятся результаты сравнительного анализа.

Лидарные исследования техногенных и парниковых газов атмосферы: аппаратура и результаты

Романовский О.А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

roa@iao.ru

Ключевые слова: атмосфера, лидар, техногенные и парниковые газы, лазерный газоанализ, дифференциальное поглощение

В настоящее время в наиболее развитых странах мира реализуются национальные и международные научные программы по мониторингу оптического и термодинамического состояния атмосферы с использованием лидарных систем, позволяющих осуществлять мониторинг метеорологических параметров, облачных и аэрозольных полей, техногенных, а также парниковых газов, в первую очередь озона и газовых составляющих озоновых циклов.

Актуальность проблемы заключается в том, что для получения достоверной информации о состоянии атмосферы необходимо одновременно измерять оптические и физические параметры атмосферы этих объектов. В настоящее время эта информация может быть получена только с использованием лазерного дистанционного зондирования Земли, что определяет научную значимость проблемы.

К преимуществам лидарного зондирования можно отнести высокое пространственное и временное разрешение получаемых данных, возможность длительных непрерывных наблюдений, оценку выбранных характеристик в любом направлении лазерного луча и на разных высотах и др.

Однако среди известных лидарных технологий нет ни одного универсального метода, который обеспечивал бы обучение от тропосферы до стратосферы. Только сочетание в многоканальном лидаре нескольких методов, основанных на использовании таких спектроскопических эффектов взаимодействия лазерного излучения с атмосферой, как резонансное поглощение, комбинационное рассеяние и резонансное рассеяние, позволяет проводить зондирование во всем необходимом высотном диапазоне от поверхностного слоя до мезосферы.

В докладе представлено сопоставление сезонных вертикальных профилей озона лидарного комплекса дифференциального поглощения Сибирской лидарной станции (СЛС) в верхней тропосфере – стратосфере, полученных с использованием вертикального распределения температуры по данным метеорологических спутников Aura, MetOp и модели ИОА. Проведен анализ и оценка влияния реальной температуры на поведение восстановленных профилей озона по лидарным измерениям 2018 и 2019 гг.

Представлены стационарный и бортовой ИК лидары дифференциального поглощения для исследования техногенных и парниковых газов в атмосфере (в частности, в российском секторе Арктики). Приводятся описание основных узлов и элементов ИК лидара для газоанализа в ближней и средней ИК области спектра и результаты измерений.

Степенной закон затухания турбулентной кинетической энергии в RANS моделировании

Ткаченко Е.В.¹, Дебольский А.В.^{1,2,3}, Мортиков Е.В.^{1,2,4}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

⁴Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, Москва, Россия

evtkachenko@hotmail.com

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, вечерний переход, кинетическая энергия турбулентности, параметризации, численное моделирование, LES, RANS

Вечерний переход между дневным конвективным и ночным устойчивым пограничными слоями в суточном ходе атмосферного пограничного слоя (АПС) характеризуется затуханием турбулентной кинетической энергии (ТКЭ), которое происходит в связи со сменой знака потока тепла на поверхности с положительного на отрицательный.

Затухание ТКЭ следует степенному закону $E(t)t_{-\alpha}$. Здесь $E(t)$ – ТКЭ и t – время, нормированные на конвективные масштабы скорости и времени (Deardorff, 1970), определяемые потоком плавучести на поверхности и высотой пограничного слоя. Параметр α определяется теоретически или экспериментально.

В данной работе исследуется воспроизведение вечернего переходного периода с помощью одномерной RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) $k - \varepsilon$ модели АПС, а также соответствие полученных степенных зависимостей тем, которые были получены в трёхмерных экспериментах в вихреразрешающих (Large-Eddy Simulations, LES) моделях. Рассматривается, как параметризация турбулентного масштаба длины, а также выбор внешних параметров эксперимента (в частности геострофический ветер, величина потока тепла на поверхности, скорость оседания), влияют на динамику затухания ТКЭ. В данном исследовании также было изучено, как меняется динамика переходного периода как при мгновенном, так и при последовательном уменьшении потока тепла на временах, характерных для суточного хода в АПС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта №20-05-00776 и Гранта Президента Российской Федерации в рамках проекта МК-1867.2020.5.

Литература:

1. Deardorff J.W. Preliminary Results from Numerical Integrations of the Unstable Planetary Boundary Layer // J. Atmos. Sci. 1970. V. 27. № 8. P. 1209–1211. doi: 10.1175/1520-0469(1970)027<1209:PRFNIO>2.0.CO;2

Тепловой баланс покрывающего слоя в условиях городской застройки

Фролькис В.А.^{1,2}, Демченко П.Ф.³, Гинзбург А.С.³

¹Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург,
Россия

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gin@ifaran.ru

Ключевые слова: городской покрывающий слой, отопление и кондиционирование зданий, антропогенные потоки тепла, полуэмпирическая энергобалансовая модель

Антропогенный поток тепла (АПТ), обусловленный расходом энергии на отопление и кондиционирование зданий, влияет на интенсивность городского острова тепла, а с другой стороны, энергопотребление городского хозяйства зависит от метеоусловий, а также от их годового и суточного хода. Из-за взаимного влияния температуры атмосферы на энергопотребление и обратного влияния АПТ на температуру атмосферы (Т) возникает Т-АПТ обратная связь: дестабилизирующая положительная в режиме кондиционирования, стабилизирующая отрицательная в режиме отопления. Исследование суточного и годового цикла взаимодействия АПТ и городского покрывающего слоя разумно изучать, используя простые полуэмпирические модели, что обусловлено неполнотой или даже отсутствующей информацией о теплофизических параметрах взаимодействия элементов городской застройки с окружающей средой.

Реализована полуэмпирическая энергобалансовая модель городского покрывающего слоя, в которой учитывается теплообмен через ограждающие конструкции зданий, позволяющая оценить антропогенный источник тепла внутри городского покрывающего слоя. Для этой цели рассматриваются различные по теплофизическим свойствам типы зданий, оцениваются генерируемые ими потоки тепла в почву и атмосферу. Обсуждается влияние теплофизических параметров конструкций на энергетический баланс окружающей среды, а также изменение фазы суточных колебаний температуры, обусловленное городской застройкой.

Работа выполнена при поддержке проектов РНФ № 16-17-00114 и РФФИ № 20-05-00254.

Литература:

1. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban Climates. 2017. Cambridge University Press. 510 p.
2. Chapman S., Watson J.E.M., Salazar A., Thatcher M., McAlpine C.A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review // Landscape Ecol. 2017. V. 32, P. 1921–1935.
3. Гинзбург А.С., Демченко П.Ф. Антропогенные мезо-метеорологические обратные связи: обзор современных исследований //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 94–113.

Беспилотный летательный аппарат для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя

Чечин Д.Г.^{1,2}, Артамонов А.Ю.², Бодунков Н.Е.³, Живоглотов Д.Н.⁴, Калягин М.Ю.³, Шевченко А.М.⁵

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³Московский авиационный институт, Москва, Россия

⁴Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия

⁵Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
chechin@ifaran.ru

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, турбулентность, беспилотный летательный аппарат

В докладе представлены результаты работ по проектировке и созданию беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с измерительным комплексом для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя, а также обсуждаются дальнейшие планы и перспективы его использования. Разрабатываемый измерительный комплекс имеет в основе те же принципы, что и комплексы, успешно используемые на пилотируемых самолетах-лабораториях в течение уже нескольких десятилетий. В частности, для определения трех компонент скорости ветра измеряется вектор воздушного потока относительно БПЛА, а также вектор скорости и три угла ориентации самого БПЛА относительно Земли. Первый вектор измеряется с помощью многоканального приемника воздушных давлений (МПВД), вынесенного перед носом БПЛА, а второй - с помощью высокоточной инерциальной навигационной системы и спутниковой системы позиционирования. Миниатюрный МПВД, удовлетворяющий ограничениям по массе и габаритам, разработан в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, где проведена его калибровка в аэродинамической трубе. Для измерения турбулентных пульсаций температуры воздуха используется термометр сопротивления в виде открытой платиновой нити, специально разработанный в Центральной аэрологической обсерватории. В результате продувки в аэродинамической трубе определен коэффициент восстановления температуры для данного датчика. В качестве альтернативного датчика температуры рассматривается использование миниатюрной термопары производства Campbell Scientific. Средние значения температуры и влажности воздуха измеряются с помощью калиброванного датчика Vaisala. Насколько известно авторам, для измерения пульсаций влажности не существует малоинерционных датчиков, которые могли бы быть использованы на легких БПЛА. В качестве компромисса используется емкостной датчик влажности со временем отклика порядка 1 секунды. Для измерения температуры подстилающей поверхности используется инфракрасный датчик температуры.

В качестве носителя измерительного комплекса может выступать любой БПЛА с летно-техническими характеристиками, удовлетворяющими задачам исследования турбулентной структуры пограничного слоя и массой полезной нагрузки не ниже порядка 1 кг. Нами используется БПЛА с аэродинамической схемой «летающее крыло» в двух модификациях: 1) гибридного типа с возможностью вертикального взлета и посадки; 2) стандартного типа со взлетом с катапульты и посадкой на парашюте. Время полета с полезной нагрузкой до 60 мин. Крейсерская скорость полета порядка 80 км/ч.

В августе 2020 года планируется использование разрабатываемого БПЛА для исследования суточного хода турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя на полигоне ИФА РАН в Цимлянске. Работа выполнена за счет гранта РНФ № 18-77-10072.

Экспериментальные исследования турбулентных флуктуаций компонент скорости и углов движений при удержании высоты беспилотным летательным аппаратом

Шелехов А.П.¹, Афанасьев А.Л.², Кобзев А.А.¹, Тельминов А.Е.¹, Шелехова Е.А.¹, Чупина О.С.¹

¹*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

ash@imces.ru

Ключевые слова: флуктуации, спектр, скорость, углы движения, беспилотный летательный аппарат, турбулентность, атмосфера

Турбулентность является важным фактором, который следует учитывать при управлении беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) малых размеров в атмосферном пограничном слое. Для таких БПЛА наиболее перспективными считаются применение дронов на высотах до 500 м. Хаотические вихри различных размеров, характерные для турбулентной атмосферы в этом диапазоне высот, приводят в режиме удержания высоты к случайным изменениям положения центра масс и угловых движений БПЛА при его ориентации в пространстве со временем. Таким образом, задача учета влияния турбулентных вихревых образований, сопутствующих движению БПЛА, представляет научный и практический интерес, особенно для пересеченной местности, например, в условиях городской застройки. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований спектров флуктуаций компонент скорости, а также и углов тангажа, крена и рысканья БПЛА, в режиме удержания высоты в турбулентной атмосфере. Исследования турбулентных спектров проводились на территории Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, которая может служить примером городской застройки. При проведении эксперимента квадрокоптер DJI Phantom 4 Pro поднимался на высоту порядка 30 м над поверхностью земли и удерживался в режиме удержания высоты в течение 15–20 минут в непосредственной близости от АМК-03. Квадрокоптер был ориентирован так, что ось, проходящая через переднюю часть БПЛА, была направлена на север, а пространственная ориентация АМК-03 позволяла измерять компоненты скорости атмосферного турбулентного потока. Установлено, что флуктуации скорости беспилотного летательного аппарата являются анизотропными полем, а в высокочастотной области спектров подчиняются закону Колмогорова-Обухова только в горизонтальной плоскости. В пределах инерционного интервала флуктуации углов тангажа, крена рысканья квадрокоптера подчиняются закону «пяти третей», а ход самого спектра приблизительно совпадает со спектром флуктуаций компонент скорости турбулентного потока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06066 мк.

Фёновый эффект на Шпицбергене: влияние на структуру пограничного слоя и турбулентный теплообмен

Шестакова А.А., Чечин Д.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
shestakova.aa.92@gmail.com

Ключевые слова: фён, Шпицберген, тепловой баланс, орографические ветры

Сильные ветра, известные как подветренные бури, часто наблюдаются на западных склонах архипелага Шпицберген. Однако систематические исследования подветренных бурь и особенно создаваемого ими фёнового эффекта пока отсутствуют. В данном исследовании проводится анализ структуры орографических ветров на Шпицбергене, а именно, подветренной бури, каньонных и мысовых ветров, и их влияния на пограничный слой и тепловой баланс. Используются уникальные данные наблюдений, которые проводились во время одного из эпизодов фёна 30-31 мая 2017 г. в рамках измерительных кампаний ACLOUD и PASCAL (измерения с самолетов Polar 5, 6 и судна Polarstern), а также данные приземных наблюдений и радиозондирования. Для анализа трехмерной структуры орографических ветров дополнительно использовались расчеты с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW.

Анализ данных наблюдений и моделирования показал, что повышение температуры за счет фёна в нижней тропосфере достигало 10 К и характеризовалось сильной пространственной неоднородностью. Эффект повышения температуры и понижения влажности за счет фёна прослеживался даже над морем далеко от подветренных склонов. Таким образом над относительно холодной поверхностью моря сформировался очень тонкий устойчивый пограничный слой.

Численные эксперименты показали, что наиболее благоприятные для развития подветренной бури условия наблюдаются при значениях числа Фруда около 1 или немного меньше, в то время как каньонные ветры становятся более интенсивными при значениях числа Фруда менее 0.8.

Изучаемый эпизод фёна привел к интенсификации турбулентного теплообмена между атмосферой и снежной поверхностью (в Нью-Олесунне и в районе Лонгйира) из-за увеличения скорости ветра, больших градиентов температуры и влажности и увеличения потока коротковолновой радиации при ясном небе (т.н. фёновое окно). Показано, что фён привел к ускоренному таянию снега и почти полному его исчезновению в районе Лонгйира.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 18-77-10072.

Вероятностный прогноз ветровых порывов

Юшков В.П.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
vpushkov@gmail.com*

Ключевые слова: *вероятность, порывы, неопределённость, мезомасштабные флуктуации*

Статистический анализ данных длительных непрерывных измерений скорости ветра на 6 высотах на Останкинской телебашне, в сопоставлении с данными высокочастотных измерений в городской среде и в загородной местности, а также с данными дистанционных содарных измерений, показал, что мезомасштабные флуктуации скорости ветра обладают общей вероятностной структурой и имеют универсальное распределение максимумов. По данным натурных измерений рассчитана эмпирическая функция распределения экстремальных флуктуаций скорости ветра, нормированных на их среднеквадратичное отклонение σ_v , за референсный период между метеорологическими сроками (3 часа). Хвост распределения Фреше для максимальных нормированных порывов описывается в полулогарифмическом представлении прямой, проходящей через значения 2.8 ± 0.05 для вероятности превышения 10 %, и 3.6 ± 0.1 для вероятности превышения в 1 %. Сохранение этой функции распределения на разных высотах, при измерении разными приборами и в разных точках наблюдений, говорит о её универсальности и позволяет использовать её для расчета вероятностей редких максимальных порывов ветра в Московском и Центральном регионе России, при наличии прогноза средней скорости ветра и энергетики мезомасштабных флуктуаций в численных моделях.

Механизм формирования локальных струйных течений на высотах нижней термосферы

Беляев А.Н.

*Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова Росгидромета, Москва, Россия
anb52@mail.ru*

Ключевые слова: *внутренние гравитационные волны, нижняя термосфера, опрокидывание волны, силы плавучести, затопленная пульсирующая струя*

Результаты исследований тонкой слоистой структуры нижней термосферы по данным химических трассеров [Larsen, 2002] и акустического зондирования в диапазоне инфразвуковых волн [Chunchuzov et al., 2015] показали, что тонкая структура поля ветра нижней термосферы представляет собой набор спорадических слоистых образований, постоянно присутствующих на фоне поля ветра глобальной атмосферной циркуляции. Эти особенности вертикального профиля ветра характеризуются резким локальным увеличением величины его скорости до 100 – 150 м/с в атмосферных слоях толщиной порядка 10 км или менее. Объяснить появление такого типа слоистых структур в рамках существующих представлений не представляется возможным. В настоящем докладе рассматривается физический механизм генерации локальных струйных течений на высотах нижней термосферы, скорость которых может лежать в указанном выше диапазоне. В его основе лежит механизм опрокидывания/обрушения внутренних гравитационных волн (ВГВ) на высотах верхней мезосферы - нижней термосферы, обусловленный падением с высотой плотности атмосферы. Опрокидывание волны приводит к образованию турбулентной зоны, движущейся с фазовой скоростью породившей её волны. В результате в устойчиво стратифицированной нижней термосфере образуется слой с нейтральной температурной стратификацией, который ускоряется под действием сил плавучести и превращается в пульсирующую затопленную струю, скорость которой противоположна фазовой скорости породившей её волны. В основе математической 2D-модели данного механизма лежит нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка, полученное из системы уравнений гидродинамики в приближении Буссинеска. В заключение рассматривается возможность объяснения с помощью предлагаемого механизма таких явлений как спорадический Е-слой ионосферы, сопровождающийся квазипериодическими колебаниями радарного эхо, и так называемого явления «мезосферной бory»

Литература:

1. Chunchuzov, I.P., Kulichkov, S.N., Perepelkin, Popov, O.E., Fistov, P.P., Assink, J.D., Marchetti, E., 2015. Study of the wind velocity-layered structure in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere by using infrasound probing of the atmosphere. *J. Geophys. Res. (A)*, 120, 8828-8840.
2. Larsen, M.F., 2002. Winds and shears in the mesosphere and lower thermosphere: Results from four decades of chemical release wind measurements. *J. Geophys. Res.*, 107(A8), 1215.

Статистика ионосферных возмущений по данным спутниковой миссии Swarm в 2014г.

Волобоев Л.А.¹, Захаров В.И.^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова Физический факультет, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

l.voloboev@mail.ru

Ключевые слова: Swarm, ионосфера, индекс сцинтилляций, электронная концентрация

В данной работе рассматриваются вопросы исследований статистики флуктуаций электронной концентрации в ионосфере Земли в различных гео-гелиофизических условиях по данным спутниковых измерений в 2014 г.

Источником экспериментальных данных служит массив высокочастотных наблюдений со спутниковой миссии Swarm ESA, предназначенной для изучения магнитного поля Земли. Миссия стартовала в 2013 г. и состоит из трёх спутников на различных полярных орбитах. На каждом космическом аппарате, помимо основного магнитометрического оборудования, установлены зонды Ленгмюра, ведущие высокочастотные измерения электронной концентрации.

В настоящей работе использованы данные об электронной концентрации, полученные с частотой 2 Гц. Вычисляется средняя мощность шумов флуктуаций – индекс аналогичный амплитудному индексу сцинтилляций S4, подбираются окна фильтрации, соответствующие требуемому пространственному разрешению. Вычисляется индекс RODI (Rate of Change of Density Index) [1].

На основе базы данных индексов Kp и AE магнитного поля рассматривается влияние солнечной активности на флуктуации электронной концентрации в северном полушарии в 2014 г. Так проведено сравнение сцинтилляций в условиях со спокойной геомагнитной обстановкой (6 января 2014 г., Kp = 1-2) и с возмущенной геомагнитной обстановкой (12 сентября 2014 г., Kp = 4-5).

Также в работе рассчитаны корреляции индексов S4 и RODI10s в различных условиях. Наиболее сильная корреляция наблюдалась в случае с возмущенной геомагнитной обстановкой (коэффициент корреляции $r = 0,64$).

Предварительные исследования показали, что индекс S4 чувствителен к глобальным вариациям индекса AE и не менее, чем индекс RODI чувствителен к высокоширотным вариациям электронной плотности, что позволяет отчетливее разглядеть тонкую плазменную структуру авроральных областей.

Литература:

1. Jin, Y., Spicher, A., Xiong, C., Clausen, L. B. N., Kervalishvili, G., Stolle, C., & Miloch, W. J. Ionospheric plasma irregularities characterized by the Swarm satellites: Statistics at high latitudes // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2019. V. 124 (2). P. 1262–1282.

Новый подход к сравнению смоделированных и наблюдаемых микробаром

Воробьева Е.^{1,2}, Де Карло М.^{3,4}, Нашхолм С.П.^{2,5}, Ля Пишон А.³

¹Норвежский университет науки и технологии, Тронхейм, Норвегия

²NORSAR, Хьеллер, Норвегия

³CEA, DAM, DIF, Арпажон, Франция

⁴Университет Бреста, Брест, Франция

⁵Университет Осло, Осло, Норвегия

ekaterina.vorobeva@ntnu.no

Ключевые слова: инфразвук, микробаромы, цифровая обработка сигнала, стратосфера, атмосферные модели

В настоящей работе исследуется новый подход к сравнению смоделированных амплитуд микробаром с инфразвуковыми данными, записанными на наземных станциях. Данные, записанные на станции IS37 на севере Норвегии в течение 2014 – 2019 гг., были обработаны для создания веспаграмм (результат анализа спектра скоростей), которые представляют микробаромы как функцию времени и азимута. Расчеты выполнены для пяти частотных полос в пределах 0.1 – 0.6 Гц. Азимутальное разрешение между моделью и наблюдениями гармонизируется путем сглаживания смоделированного поля давления по оси азимута с ядром, соответствующим частотно-зависимому разрешению инфразвукового массива. Схожесть между моделью и наблюдениями анализируется на основе среднеквадратичной ошибки. Анализ показал, что веспаграммы могут отслеживать сезонные изменения в азимутальном распределении, амплитуде и частоте микробаром, а также характерные изменения в направлении прихода сигнала во время внезапных стратосферных потеплений. Предложенный в настоящей работе подход является недорогим в вычислительном отношении и может отслеживать изменчивость микробаром, имея потенциал для оценки атмосферных моделей и диагностики стратосферы в близком к реальному времени режиме.

Использование функции Кирквуда для анализа радиозатменных сигналов

Горбунов М.Е.^{1,2}, Коваль О.А.¹

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Гидрометцентр России, Москва, Россия*

gorbunov@ifaran.ru

Ключевые слова: радиозатменное зондирование, частотно-временной анализ, функция Вигнера, функция Кирквуда

Функция Вигнера была изначально введена в квантовой механике, но в дальнейшем получила применение во частотно-временном анализе сигналов. В частности, она применяется для анализа радиозатменных сигналов. Применение частотно-временных представлений является эффективным средством визуализации сигнала и анализа его структуры. В таких представлениях одномерный сигнал разворачивается в двумерном фазовом пространстве. Для радиозатменных данных удобнее всего оказалось представление фазового пространства с координатами прицельная высота – угол рефракции луча. Эти координаты через орбитальные данные спутников связаны с временем и доплеровской частотой сигнала. Функция Вигнера обладает рядом замечательных свойств, делающих ее гораздо более эффективной, нежели спектрограмма, получаемая при помощи Фурье-анализа в скользящих апертурах. В частности, она обеспечивает гораздо более высокое разрешение. Однако вычисление функции Вигнера требует значительных компьютерных затрат, поскольку формально для этого требуется многократное вычисление Фурье-образа в объеме полного сигнала. Менее известна функция Кирквуда, которая также была изначально введена в квантовой механике. И функция Вигнера, и функция Кирквуда асимптотически (при уменьшении длины волны) стремятся к микроканоническому распределению. Однако вычисление функции Кирквуда существенно проще. Для этого требуется лишь одно большое Фурье-преобразование. При этом между этими функциями существует простая связь в виде оператора свертки. Мы рассматриваем примеры вычисления функций Вигнера и Кирквуда для радиозатменных данных и показываем, что функция Кирквуда позволяет визуализировать структуру сигнала. Мы рассматриваем алгоритм быстрого вычисления функции Вигнера, сглаженной по объему квантовой ячейки, основанный на вычислении функции Кирквуда и применении дробного преобразования Фурье. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-35-00368 и 20-05-00189.

Радиозондовые исследования внутренних волн в атмосфере Земли с помощью усовершенствованного метода годографа скорости ветра

Губенко В.Н., Кириллович И.А.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская область, Россия

vngubenko@gmail.com

Ключевые слова: *внутренние гравитационные волны, атмосфера Земли, радиозондовые измерения, метод анализа годографа скорости ветра*

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) определяют атмосферную динамику на всех высотах, обеспечивая эффективный механизм переноса волновой энергии и импульса из нижних слоев атмосферы Земли в верхние. Практическое применение классического метода годографа к анализу радиозондовых измерений скорости ветра сталкивается с трудностями, когда собственная частота волны (определяемая в системе отсчета, движущейся вместе с невозмущенным потоком) заметно превышает значение инерционной частоты (параметр Кориолиса). В этом случае, величина аксиального отношения для экспериментально определяемого эллипса поляризации ВГВ будет мала и стандартной точности измерения скорости ветра (~ 1 м/с) в зондовых данных [1] может оказаться недостаточно для качественного восстановления собственной частоты волны с помощью поляризационного соотношения. Предлагается усовершенствование классического метода годографа, основанное на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры, которая определяется с высокой точностью (~ 0.2 К) в зондовых измерениях [1]. Для достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних волн в атмосфере Земли используется поляризационное соотношение для ВГВ между волновыми вариациями скорости ветра и температуры. В работе продемонстрирована актуальность применения модернизированного метода годографа в тех случаях, когда собственная частота внутренней атмосферной волны существенно превосходит значение параметра Кориолиса.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана РФФИ (проект № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

Литература:

1. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Диагностика насыщения внутренних атмосферных волн и определение их характеристик в стратосфере Земли с помощью радиозондовых измерений // Солнечно-земная физика. 2018 Т. 4. № 2. С. 76–85. doi: 10.12737/szf-42201807.

Определение характеристик внутренних волн в атмосферах Земли и Марса на основе анализа профилей температуры, восстановленных из радиозатменных измерений спутников CHAMP и MARS GLOBAL SURVEYOR

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Андреев В.Е.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская область, Россия
vngubenko@gmail.com

Ключевые слова: *внутренние гравитационные волны, атмосфера Земли и планет, радиозатменные измерения, вертикальные профили температуры*

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) оказывают значительное влияние на циркуляцию, химический состав и тепловой режим атмосфер планет. Важная роль внутренних волн связана с обеспечением ими эффективного механизма переноса энергии и импульса с нижних уровней атмосферы на верхние. В отсутствие диссипации энергии ВГВ в атмосфере Земли, амплитуда волновых возмущений температуры и скорости ветра растет примерно экспоненциально с увеличением высоты, поэтому возмущения с малой амплитудой вблизи поверхности могут производить значительные эффекты на больших высотах, где происходит обрушение волн и передача их энергии и импульса в невозмущенный поток. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно наблюдать в атмосферах Венеры и Марса.

Преимуществом радиозатменных измерений является широкий географический и временной охват исследуемых районов, позволяющий проводить глобальный мониторинг состояния атмосферы Земли и планет. Однако, до недавнего времени считалось, что с помощью радиозатменных измерений невозможно оценить ключевые характеристики ВГВ, которые необходимы для количественного описания волновых эффектов, поскольку исследователи полагали, что для этого недостаточно восстанавливаемых радиозатменных профилей температуры и плотности в атмосфере. Нами разработан метод, который может быть использован для идентификации волновых событий и определения параметров ВГВ в атмосфере планеты на основе анализа индивидуального вертикального профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента-Вяйсяля [1, 2]. В работе представлены результаты идентификации волновых событий и восстановления характеристик внутренних волн в атмосферах Земли и Марса на основе анализа профилей температуры, полученных в ходе проведения радиозатменных миссий CHAMP (Земля) и MARS GLOBAL SURVEYOR (Марс).

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана РФФИ (проект № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

Литература:

1. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Andreev V.E. Determination of the intrinsic frequency and other wave parameters from a single vertical temperature or density profile measurement // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D08109.
2. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Pavelyev A.A. Reconstruction of internal gravity wave parameters from radio occultation retrievals of vertical temperature profiles in the Earth's atmosphere // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4. No. 10. P. 2153–2162.

Флуктуации яркостной температуры атмосферы на частотах 18-27 ГГц, обусловленные тропосферной турбулентностью

Егоров Д.П., Кутуза Б.Г.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия
dobrix95@gmail.com

Ключевые слова: яркостная температура, структурная функция, флуктуации, водяной пар, СВЧ, тропосфера, турбулентность

Представлены результаты обработки данных эксперимента по измерению временных флуктуаций яркостной температуры нисходящего радиоизлучения безоблачной атмосферы в резонансной области поглощения водяного пара 18-27.2 ГГц. Эксперимент проведён с помощью специального многоканального СВЧ радиометра-спектрометра, разработанного в СКБ ИРЭ. Радиометр имеет 47 спектральных каналов в полосе поглощения водяного пара (18-27.2 ГГц), обладает высокой температурной стабильностью коэффициента усиления, флуктуационной чувствительностью 0.02 К при постоянной времени 1 сек. и угловым разрешением 5-7 градусов в зависимости от частоты. Анализ результатов эксперимента выполнен на основе данных сеансов измерений за летний и зимний периоды 2018-2019 гг. Длительность измерительных сеансов составила от 2 до 5 часов. Полный спектр радиояркостной температуры атмосферы измеряется в течение 11 сек. Для метеорологической интерпретации измерений использовались данные наблюдений с двух ближайших метеостанций. Метеостанции с интервалом в одну минуту регистрировали температуру приземного слоя атмосферы, абсолютную влажность, атмосферное давление, скорость ветра и количество осадков.

Впервые получен спектр интенсивности временных флуктуаций нисходящего радиоизлучения в частотном диапазоне 18-27.2 ГГц. Подтверждаются результаты теоретических [1-3] и экспериментальных [4] работ о том, что за флуктуации радиоизлучения атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн ответственна пространственно-временная изменчивость поля влажности (водяного пара). Получены экспериментальные зависимости интенсивности флуктуаций радиоизлучения атмосферы от абсолютной влажности ρ и температуры T её приземного слоя. С ростом значений ρ и T наблюдается рост интенсивности флуктуаций радиояркостной температуры. Разброс значений интенсивности, особенно для наблюдений летнего периода, обусловлен изменчивостью температурно-влажностных профилей атмосферы и отсутствием полной корреляции между значением приповерхностного метеопараметра и высотным распределением того же метеопараметра.

Литература:

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука. 1967. 548 с.
2. Станкевич К.С. О флуктуациях радиоизлучения атмосферы. Изв. ВУЗов, Радиофизика. 1960. Т.3. №6. С.969.
3. Арманд Н.А. Флуктуации теплового излучения атмосферы на сантиметровых и миллиметровых волнах. Радиотехника и электроника. 1961. Т.6. №12. С.1961.
4. Kutuza B.G. Spatial and temporal fluctuations of the atmospheric microwave emission. Radio Science. 2003. Vol.38. №3. PP.12-1 – 12-7.

Отклик динамических процессов внетропической стратосферы на разные типы положительной фазы ЭНЮК

Ермакова Т.С.^{1,2}, Погорельцев А.И.^{1,2}, Коваль А.В.^{1,2}

¹*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

taalika@mail.ru

Ключевые слова: планетарные волны, динамика стратосфера, ЭНЮК

Сравнивая реакцию планетарных волн (ПВ) и остаточную циркуляцию на высотах внетропической стратосферы в зимний период времени в различных условиях, вызванных тремя типами (Модоки I, II и каноническим) положительной фазы Эль-Ниньо южного колебания (ЭНЮК), была сделана попытка выявить характерные особенности в поведении волн в условиях каждого типа Эль-Ниньо по данным реанализов JRA-55 и MERRA2.

Анализ поведения ПВ на высотах стратосферы показывает, что большие амплитуды (>2500 м) стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 1 (СПВ1) наблюдаются в разные месяцы, не зависимо от типа Эль-Ниньо. Амплитуды более 1000 м стационарной планетарной волны с зональным волновым числом 2 (СПВ2) наблюдаются в те же зимы, что и для СПВ1, некоторые из них даже в те же месяцы. Обращает на себя внимание волновая активность СПВ2 в марте. Амплитуда более 500 м характерна для марта во время Модок I. Противоположная ситуация наблюдается во время Модок II, уже во второй половине февраля волновая активность практически отсутствует. Канонические зимы демонстрируют слабую волновую активность в первой декаде марта или ее отсутствие вообще.

Наблюдаемая временная изменчивость амплитуд и фаз зональных гармоник обусловлена наложением изменчивости СПВ, которая может быть объяснена изменением условий их распространения из тропосферы и нелинейным взаимодействием со средним потоком, а также наличием в данных реанализа бегущих и стоячих ПВ. Анализ поведения бегущих (распространяющихся на восток и запад) и стоячих ПВ, в свою очередь также нестационарных, демонстрирует отсутствие явной зависимости от типа Эль-Ниньо.

Построенная для каждого зимнего месяца остаточная циркуляция демонстрирует разное распределение потоков во внетропических широтах. Принимая во внимание, что аномалии температуры поверхности океана наблюдаются в разных регионах Тихого океана для каждого типа Эль-Ниньо, а также разное время начала появления этих аномалий, наблюдаемое в значениях MEI, и предыдущую фазу ЭНЮК, можно предположить, что другие тропосферно-стратосферные процессы вмешиваются на прямую или через дальние связи, влияя на условия распространения ПВ в стратосфере.

Работа выполнена по проекту в рамках гранта РНФ № 19-17-00198.

Волновые проявления в верхней атмосфере крупных синоптических процессов по данным дистанционных и контактных методов

Захаров В.И.^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова Физический факультет, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

zvi_555@list.msu.ru

Ключевые слова: атмосфера, ионосфера, акустико-гравитационные волны, землетрясения, циклон, возмущения электронной концентрации

Рассмотрены различные проявления ионосферных возмущений верхней атмосферы (ионосферы), связанные с периодами действия крупных синоптических процессов на примере тропических циклонов (ТЦ). Во-первых, с использованием статистически значимого материала показано, что методика GPS-наблюдений является эффективной для выделения отклика верхней атмосферы на глобальные синоптические процессы корреляционными методами. Использование метода GPS-интерферометрии показывает, что выделенные волновые структуры географически связаны с местами орографических возмущений. Например, возможна генерация акустико-гравитационных волновых возмущений на береговой линии при ее обтекании воздушными массами, захваченными тайфуном. Установлено, что возбуждение таких волновых структур наиболее эффективно происходит при большой скорости развития или спада тайфуна. При этом резко меняется структура, а именно, параметр спадания спектра волновых

Наряду с этим, возможно генерация волновых возмущений самим ТЦ при его развитии. Волны распространяются на ионосферные высоты и приводят к колебаниям возмущений плотности, которые могут модулировать электронную концентрацию в ионосфере.

В работе мы провели сравнение параметров волновых возмущений, определенных для наиболее крупных ТС 2014 г. с параметрами волноподобных возмущений плазмы на высотах пролетов спутников ECA SWARM и выделяемых зондами Ленгмюра. При детектировании волновых явлений мы рассматриваем экспериментальные проявления атмосферно-ионосферного взаимодействия, выявленные во время действия крупнейших ТС 2014г. Всего рассмотрено более 60 дней циклонической активности, протекавшей в спокойных геофизических условиях.. В это время сила циклона по шкале Саффира-Симпсона превышала 4-тую категорию.

Получено, что в основном волновые проявления ТС имеют акустико-гравитационный характер. Размеры области проявления волновых возмущений в ионосфере для всех проанализированных ситуаций составляют от 1000 до 1200 км. В тоже время, проведенный анализ показывает, что возможны и иные, не волновые, проявления ТЦ в верхней атмосфере.

Работа выполнена в рамках Государственного задания МГУ (N 01200408544) при частичной поддержке грантами РФФИ 19-05-00941.

Параметры внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды сигнала в спутниковом радиозатменном эксперименте

Кан В.¹, Горбунов М.Е.^{1,2}, Шмаков А.В.¹, Федорова О.В.¹, Софиева В.Ф.³

¹*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

²*Гидрометцентр России, Москва, Россия*

³*Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland*

valerykan@list.ru

Ключевые слова: радиозатменное зондирование атмосферы, флуктуации амплитуды сигнала, восстановление параметров внутренних волн

Разработан метод восстановления статистических параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере по флуктуациям амплитуды в спутниковых радиозатменных наблюдениях. В формировании флуктуаций радиосигнала доминирующую роль играют ВГВ, а вклад изотропной турбулентности пренебрежимо мал. При разработке методики рассмотрены следующие вопросы: 1) выбор модели пространственного спектра внутренних волн; 2) вывод соотношений, связывающих статистические параметры спектров ВГВ и флуктуаций амплитуды, в приближении фазового экрана и слабых флуктуаций; 3) разработка алгоритма восстановления; 4) оценка возможных ошибок. Восстанавливаемыми параметрами вертикального спектра ВГВ являются внешний масштаб, определяющий переход от ненасыщенного режима волн к насыщенному в крупномасштабной области, и структурная характеристика, определяющая спектр ВГВ в режиме насыщения.

Проведена апробация разработанной методики на данным радиозатменных измерений GPS-COSMIC (Global Positioning System - Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate), проведенных в январе-феврале и июне-июле 2011 г. Рабочий диапазон охватывает высоты от 28 км до верхней границы тропопавузы. Восстановлено высотно-широтные распределения внешнего масштаба и структурной характеристики, а также рассчитанных по этим параметрам интегральных характеристик активности внутренних волн - дисперсии температурных флуктуаций и потенциальной энергии. Отмечены характерные особенности этих распределений, проведено сравнение результатов с данными других измерений. Разработанная методика может успешно использоваться для глобального мониторинга параметров и активности ВГВ в средней атмосфере.

Авторы благодарят за поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 20-05-00189 А) и Академию Финляндии (экспертный центр по обратным задачам и проект TT-AVA).

Литература:

1. Kan V., Gorbunov M.E., and Sofieva V.F. Fluctuations of radio occultation signals in sounding the Earth's atmosphere // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11. P. 663–680. <https://doi.org/10.5194/amt-11-663-2018>.

Внезапное стратосферное потепление: численное моделирование глобальных волн и остаточной меридиональной циркуляции

Коваль А.В.^{1,2}, Гаврилов Н.М.¹, Погорельцев А.И.^{1,2}, Ермакова Т.С.^{1,2}, Ефимов М.М.¹

¹*Кафедра физики атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

²*Кафедра метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

a.v.koval@spbu.ru

Ключевые слова: меридиональная циркуляция, остаточная циркуляция, преобразованное Эйлерово среднее, внезапное стратосферное потепление, численное моделирование

Изучение остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ), основанной на подходе в рамках преобразованного Эйлера среднего, полезно для эффективного анализа воздействия волн на средний поток, а также дает возможность диагностировать процессы переноса атмосферных газов в атмосферу. Широко известно, что крупномасштабные волновые возмущения в средней атмосфере и области МНТ являются основной движущей силой ОМЦ. В данном исследовании мы сосредоточились на изучении структур таких волн и связанных с ними изменений ОМЦ во время зимних месяцев в северном полушарии, на разных стадиях внезапного стратосферного потепления. Используется трехмерная нелинейная численная механистическая модель средней и верхней атмосферы (МСВА), позволяющая моделировать общую циркуляцию атмосферы на высотах 0–135 км. Для повышения статистической достоверности рассмотрен ансамбль из 19 модельных расчетов. Такой подход позволил нам получить набор смоделированных событий ВСП, статистически близких к климатологии ВСП, полученной из данных многолетнего реанализа и ассимиляции метеорологической информации. Численное моделирование показало общее ослабление ОМЦ после стратосферного потепления, особенно ярко выраженное на высотах МНТ. Во время потепления также наблюдается существенное усиление меридиональной и вертикальной компонент остаточной циркуляции в высокоширотной верхней стратосфере. Связанные с этим изменения скорости адиабатического нагрева в этом слое способствуют нагреву стратосферы и охлаждению мезосферы во время потепления. В южном полушарии компоненты среднего остаточного ветра слабее, чем в северном, основные различия во время и после моделирования стратосферного потепления приходится на высоты МНТ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 20-77-10006.

Исследование температурного режима области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения в Восточной Сибири

Медведева И.В.^{1,2}

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
ivmed@iszf.irk.ru*

Ключевые слова: температура, мезопауза, атмосферные волны, солнечная активность

Приводятся результаты исследования сезонных, межгодовых вариаций, а также отклика на солнечную активность температуры атмосферы на высотах мезопаузы в регионе Восточной Сибири. Анализ основан на данных спектрометрических измерений параметров эмиссии молекулы гидроксила (полоса (6-2), 834.0 нм, высота максимума излучения ~87 км), проводимых в патрульном режиме в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (51.8°N, 103.1°E, Торы). Измерения проводятся в ночное время суток, временное разрешение 10 минут. Вращательная температура молекулы гидроксила, вычисляемая по распределению первых трех линий Р-ветви колебательно-вращательной полосы OH(6-2), соответствует температуре атмосферы на высоте излучения (область мезопаузы). Сезонные вариации температуры OH рассчитывались при помощи гармонического анализа. Анализ межгодовых вариаций средней температуры, а также амплитуд и фаз первых трех сезонных гармоник выявил наличие квазипериодических осцилляций, которые могут быть обусловлены проявлением квазидвухлетних и 5.5-летних вариаций на высотах области мезопаузы. После исключения из температурного ряда регулярного сезонного хода, проанализированы остаточные вариации температуры. Обнаружено усиление температурной изменчивости, вызванной активностью планетарных волн, в зимние месяцы, а также в периоды около равноденствий. Возможной причиной наблюдаемого эффекта могут быть возмущения динамического режима средней атмосферы, в периоды зимних внезапных стратосферных потеплений и сезонной перестройки атмосферной циркуляции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00212. В работе были использованы экспериментальные данные ЦКП «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>), полученные в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

Спектральный анализ геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 8 суток до 17 суток

Рябова С.А.^{1,2}, Шалимов С.Л.²

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

riabovasa@mail.ru

Ключевые слова: планетарные волны, вариации магнитного поля Земли, амплитудно-модулированное колебание, лунно-солнечный прилив

Под действием различных факторов магнитное поле Земли (напряженность поля и его элементов) изменяется во времени [1]. Настоящее исследование посвящено анализу возможных факторов, которые могут вызвать периодические вариации геомагнитного поля в диапазоне периодов от 8 суток до 17 суток. Спектральный анализ геомагнитных вариаций выполняется с привлечением данных регистрации геомагнитного поля на Геофизической обсерватории «Михнево» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, проведенной в зимний и летний периоды времени в 2009 г. и 2015 г. В ходе обработки и анализа данных идентифицированы гармоники 27-суточной периодичности; гармоники, связанные с их модуляцией более длинопериодными вариациями и, наконец, гармоники с периодами, близкими к периодам приливных и планетарных волн. Установлены особенности проявления таких гармоник в зависимости от сезона (лето или зима) и от солнечной активности (низкая в 2009 г. и высокая в 2015 г.).

Литература:

1. Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные вариации в приземной зоне Земли. М.: Графитекс, 2019. 150 с.

**Исследование проявления атмосферных волн во временных
вариациях геомагнитного поля (обсерватория "Бельск")
и ионосферной критической частоты F2-слоя
(ионосферная станция "Варшава")**

Рябова С.А.^{1,2}, Шалимов С.Л.²

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

riabovasa@mail.ru

Ключевые слова: атмосферные приливы, планетарные волны, критическая частота F2-слоя, геомагнитное поле

В ряде исследований получено, что проявление атмосферных волн (атмосферные приливы, планетарные волны) наблюдается не только в нижней и средней атмосфере, но и в ионосфере, включая ионосферный слой F2. Цель настоящих исследований – совместный анализ вариаций геомагнитного поля в приземном слое атмосферы и ионосферной критической частоты F2-слоя (foF2). Изучаются волны с периодами около 5, 10 и 16 сут. В качестве исходных данных используются данные геомагнитного мониторинга на обсерватории "Бельск" Польской академии наук (BEL) и данные о foF2 с ионосферной станции "Варшава" (MZ152).

**Температурные профили высокого разрешения,
восстановленные по измерениям бихроматических мерцаний
звезд фотометрами GOMOS/Envisat**

Софиева В.Ф.¹, Далоде Ф.², Хочкорн А.², Кан В.³

¹*Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland*

²*Université Versailles St-Quentin, Sorbonne Université, CNRS/INSU, LATMOS-IPSL, Guyancourt, France*

³*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
valerykan@list.ru

Ключевые слова: спутниковое зондирование атмосферы, хроматические мерцания звезд, восстановление температурных профилей

Разработан усовершенствованный алгоритм восстановления температурных профилей с высоким вертикальным разрешением (H RTP - High-Resolution Temperature Profiles) по оккультационным наблюдениям бихроматических мерцаний звезд. Метод восстановления основан на хроматической рефракции света в атмосфере, которая приводит к временной задержке бихроматических сигналов, пропорциональной углу рефракции. Алгоритм был применен к измерениям мерцаний звезд двумя быстрыми фотометрами GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) на спутнике Envisat. Измерения проводились в 2002–2012 гг. Рассмотрены основные принципы алгоритма для восстановления вертикальных профилей плотности, давления и температуры в стратосфере по измерениям мерцаний. Температурные профили восстанавливаются с высоким вертикальным разрешением (до 200 м) и точностью 1-3 К на высотах 15-32 км по всему глобусу. Лучшая точность достигается для вертикальных оккультаций, при этом точность слабо зависит от яркости звезды. Разработанный алгоритм с использованием FMI-процессора применен ко всей базе данных GOMOS и результаты (H RTP FSP v1) находятся в открытом доступе. Для валидации структуры мелкомасштабных флуктуаций проведено сравнение вертикальных спектров флуктуаций температуры, измеренных радиозондами, и восстановленных по H RTP для оккультаций с перигеями, расположенными вблизи станций зондирования. Показано, что спектральные характеристики температурных флуктуаций, полученные по H RTP и зондовым измерениям, близки друг к другу. H RTP могут быть использованы в атмосферных моделях, используемых для исследований динамики стратосферы и активности внутренних волн. В качестве примера геофизического приложения метода рассчитано глобальное распределение потенциальной энергии внутренних волн по базе данных H RTP 2002-2011 гг. Полученные характеристики пространственно-временного распределения энергии внутренних волн согласуются с результатами других измерений.

Литература:

1. Sofieva, V. F., Dalaudier, F., Hauchecorne, A., and Kan, V. High-resolution temperature profiles (H RTP) retrieved from bi-chromatic stellar scintillation measurements by GOMOS/Envisat, Atmos. Meas. Tech, 2019, v. 12, pp. 585–598, <https://doi.org/10.5194/amt-12-585-2019>.

Использование мезомасштабных диполей потенциального вихря для прогноза глубокой влажной конвекции

Юсупов Ю.И.

НПЦ «МЭП Мейкер», Москва, Россия

usupov@gismeteo.com

Ключевые слова: *потенциальный вихрь, диполь, конвекция, фронт*

Исследование структуры потенциального вихря (PV) проводилось с помощью мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 6X6 км на примере Московского катастрофического шторма 29 мая 2017 г. В результате эксперимента выяснилось, что модель способна воспроизводить горизонтально ориентированные диполи аномалий PV в средней тропосфере вокруг конвективного восходящего потока. Диполи располагаются вдоль линии фронта по направлению вектора среднего сдвига ветра в слое 0 – 6 км. Кроме того, в структуре мезомасштабного потенциального вихря в бароклинной зоне были замечены триполи (+ - + аномалии PV), перемещающиеся вдоль фронта.

В работе представлен прогноз развития ситуации с 6 ч до 22 ч МСВ 29 мая 2017 г. с 10-минутным шагом по времени. Классический подход к решению задачи прогноза конвективных явлений состоит в определении степени конвективной неустойчивости атмосферы. Однако, значение энергии неустойчивости (CAPE) в исследуемый период было небольшим – около 200 дж/кг, глубокая влажная конвекция была реализована благодаря сильному вынуждению из-за быстро перемещающегося фронта (скорость 50 – 60 км/ч). Прогнозы конвективных явлений на текущий день, рассчитанные с помощью известных индексов неустойчивости, показывали отрицательный результат. В то же время, рассчитанное по информации мезомасштабной модели WRF-ARW поле потенциального вихря в средней тропосфере показывало с заблаговременностью до 15 час развитие сильной конвекции в Московском регионе. Учитывая, что диполи PV разворачиваются в горизонтальную плоскость только в бароклинной зоне (при горизонтальном градиенте температуры) и при сдвиге ветра порядка 10 м/с в слое 0-6 км, предложено использовать оперативные расчеты мезомасштабного PV в тропосфере для прогноза зон активной конвекции. Сравнение прогностических полей мезомасштабного PV с данными наблюдений метеорологических радиолокаторов показало хорошее совпадение, что позволяет сделать вывод об эффективном использовании оперативных расчетов мезомасштабного PV для повышения качества наукастинга при прогнозе зон активной конвекции, опасных и неблагоприятных явлений погоды.

Литература:

1. Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2017 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М. В. Ломоносова. /под ред. М. А. Локощенко. – Москва: МАКС Пресс, 2018, с. 99-115
2. Юсупов Ю. И. Метод прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля //Метеорология и гидрология. – 2013. – №. 11. – С. 55.

О некоторых общих проблемах теории распространения волн и геофизической гидродинамики

Якушкин И.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

iyakushkin@yandex.ru

Ключевые слова: Волна, структура, фокусировка, турбулентность, неустойчивость

Доклад посвящен некоторым выводам из работы авторов в двух лабораториях ИФА под руководством В.И. Татарского и Ф.В. Должанского в сотрудничестве со своими коллегами Н.Н. Романовой, В.И. Кляцкиным и другими. Научной проблемой, связавшей теорию волн с гидродинамикой, была проблема распространения оптического излучения в атмосфере, которой занимались сотрудники ИФА под руководством В.И. Татарского. К началу 70-ых годов всеобщее внимание привлекала проблема случайных фокусировок оптического излучения в турбулентной среде, экспериментально наблюдавшихся А.С. Гурвичем и его сотрудниками. Их теоретическое изучение оказалось связано с применением методов геометрической оптики, т.е. своего рода течений сжимаемой жидкости [1]. В работах В.И.Кляцкина была установлена связь оптических фокусировок с кластеризацией пассивной примеси в потоках жидкости. Образование своего рода структур происходит и при формировании ударных волн в нелинейной акустике. Такие фронты являются результатом своего рода упругих или неупругих соударений между волновыми пакетами, и имеют сходство с интерференционными структурами в области фокусировки в оптике.[2] Развитием аналогии между механикой (геометрической оптикой) и гидродинамикой является использование метода Гамильтона, что получило развитие в работах В.П. Гончарова и Н.Н. Романова. Применяя этот метод, мы выделяем отдельные структуры, которые сохраняют свои свойства в пространстве и времени [3, 4]. Подобные же структуры устойчивые и неустойчивые наблюдались в экспериментах, проводившихся под руководством Ф.В. Должанского. Поведение вихрей в этих экспериментах позволяет также рассмотреть образование мелкомасштабных структур в результате соударений между вихрями и вихрей с границами области [5,6]. Сопоставление различных работ сотрудников разных лабораторий ИФА позволяет говорить об общих свойствах и режимах поведения (периодических и стохастических) вихревых и волновых структур различного происхождения.

Литература:

1. Якушкин И.Г. Изв. Вузов. Радиофизика. Т.23, № 5, 1965, С. 535–566
2. Гурбатов С. Н., Саичев А.И., Якушкин И.Г – УФН Т. 141, № 2, С.221–253
3. Якушкин И.Г. . Изв. РАН. ФАО, Т.41, №2 2005, С. 156–166
4. Романова Н.Н., Якушкин И.Г. ДАН сер. Геофизика, Т. 380, № 5, 2001, С. 330–334.
5. Данилов С.Д., Довженко В.А., Якушкин И.Г. ЖЭТФ Т.118, вып. 2(8), 2000, С. 483–494
6. Пономарев В.А., Хапаев А.А., Якушкин И.Г. Доклады РАН сер Геофизика. Т. 425, № 6, 2009, С. 821–826

Содержание

Секция I Турбулентность в атмосфере и океане

<u>Вазеева Н.В.</u> , Чхетиани О.Г., Крамар В.Ф., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Люлюкин В.С., Зайцева Д.В., Кузнецов Д.Д. Субмезомасштабные структуры в приземном слое атмосферы по данным минисодара высокого разрешения	7
<u>Вульфсон А.Н.</u> , Бородин О.О. Распределение Максвелла и стохастический ансамбль конвективных сферических термиков случайного радиуса	8
<u>Голицын Г.С.</u> , Фортус М.И. Композитные спектры и случайные процессы со стационарными приращениями	9
<u>Горчаков Г.И.</u> , Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гушин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В., Курбатов Г.А. Сальтация в турбулентной атмосфере	10
<u>Горчаков Г.И.</u> , Карпов А.В., Курбатов Г.А., Гушин Р.А., Бунтов Д.В. Вертикальные потоки аэрозоля: методика измерений, автоматизированный аппаратный комплекс, предварительные результаты измерений на опустыненной территории	11
<u>Гушин Р.А.</u> , Горчаков Г.И., Карпов А.В., Даценко О.И., Бунтов Д.В. Вертикальное распределение сальтирующих алевритовых и песчаных частиц	12
<u>Даценко О.И.</u> , Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гушин Р.А., Бунтов Д.В. Функция распределения сальтирующих частиц по размерам на опустыненной территории	13
<u>Дебольский А.В.</u> , Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Лыкосов В.Н. Исследование параметризаций вертикальной турбулентной диффузии, используемых в моделях общей циркуляции атмосферы и океана	14
<u>Иванов В.В.</u> , Поляков И.В. Интенсификация турбулентного перемешивания в верхнем слое вод восточно-атлантического сектора Северного Ледовитого океана, как возможный новый механизм Полярного усиления	15
<u>Ингель Л.Х.</u> Возникновение регулярного течения у наклонной поверхности в стратифицированной турбулентной среде	16
<u>Карпов А.В.</u> , Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Даценко О.И., Жуланов Ю.В. Автоматизированный аппаратный комплекс для исследования микроструктуры пылевого аэрозоля на опустыненных территориях	17
<u>Карпов А.В.</u> , Горчаков Г.И., Курбатов Г.А., Гушин Р.А., Даценко О.И. Исследование процесса вертикального переноса алевритовых частиц	18
<u>Копейкин В.М.</u> , Карпов А.В., Горчаков Г.И. Аппаратура и методика измерений скорости переноса электрических зарядов частицами пылевого аэрозоля	19

<u>Нерушев А.Ф.</u> , Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Зоны турбулентности в свободной атмосфере и их характеристики по данным спутниковых измерений	20
<u>Носов В.В.</u> , Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Процессы формирования турбулентности в некоторых астрономических обсерваториях	21
<u>Носов В.В.</u> , Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. Измерения турбулентных характеристик в теории подобия Мони́на-Обухова	22
<u>Носов В.В.</u> , Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В., Богушевич А.Я. Долговременные колебания температуры в приземном слое атмосферы в городах Цимлянск и Томск	23
<u>Погарский Ф.А.</u> , Полников В.Г., Ма Х., Чанг Ш. Измерение турбулентной диффузии под взволнованной поверхностью	24
<u>Полников В.Г.</u> , Цяо Ф. Характеристики турбулентности, индуцированной механическими волнами в лотке	25
<u>Руткевич П.Б.</u> , Голицын Г.С., Руткевич П.П., Тур А.В. Влияние силы Кориолиса на АКА эффект	26
<u>Сибгатуллин И.Н.</u> , Рязанов Д.А., Провидухина М.А., Ерманий Е.В., Доксуа Т. О каскаде механической энергии в Океане	27
<u>Чечин Д.Г.</u> , Люпкес К., Хартманн Й. Турбулентная структура атмосферного пограничного слоя при наличии слоисто-кучевой облачности над морским льдом в Арктике	28
<u>Чухарев А.М.</u> Генерация турбулентности поверхностными волнами: сопоставление модельных и натурных данных	29
<u>Шишов Е.А.</u> , Соленая О.А. Характерные размеры термических и вихревых структур в приземном слое атмосферы	30
<u>Юшков В.П.</u> Флуктуации давления в турбулентной атмосфере	31

Секция II. Геофизическая гидродинамика

<u>Баданов А.Ю.</u> , Рубинштейн К.Г., Юсупов Ю.И. Диагностика наличия глубокой конвекции с использованием спутниковых данных	32
<u>Баутин С.П.</u> , Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков и ее использование	33
<u>Волков В.В.</u> , Струнин М.А., Струнин А.М., Кири́н Д.В., Колокутин Г.Э. Исследования структуры сдвигов ветра и характеристик турбулентности в облачной системе теплого фронта с помощью самолёта-лаборатории	34
Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., <u>Чхетиани О.Г.</u> Многорежимность в тонких вращающихся слоях жидкости	35
<u>Голицын Г.С.</u> , Байдаков Г.А., Троицкая Ю.И.б Анализ частотных спектров морского волнения и законов разгона с точки зрения вероятностных законов А. Н. Колмогорова и его школы	36

<u>Жиленко Д.Ю.</u> , Кривоносова О.Э. Влияние шума на выбор волнового числа в течениях с вращением	37
<u>Иванов Н.Е.</u> , Демчев Д.М., Нестеров А.В. Использование теории нормальной корреляции векторов А.М. Обухова для научных исследований и инженерных расчётов дрейфа льда в Северном Ледовитом океане	38
<u>Ингель Л.Х.</u> К нелинейной динамике турбулентных термиков	39
<u>Ингель Л.Х.</u> , Макоско А.А. К теории мезомасштабных циркуляций над термически неоднородной подстилающей поверхностью	40
<u>Калашник М.В.</u> Бароклинная неустойчивость в поверхностной геострофической модели	41
<u>Калашник М.В.</u> Бароклинная неустойчивость струйных течений, связанных с фронтальными разделами в атмосфере	42
<u>Калашник М.В.</u> , Чхетиани О.Г. Бароклинная неустойчивость и нелинейные вассилляции в атмосфере	43
<u>Калашник М.В.</u> , Курганский М.В., Кострыкин С.В. Гидродинамическая неустойчивость поверхностных периодических течений	44
Кошель К., Рыжов Е., Степанов Д., <u>Berloff P.</u> Кластеризация плавучих примесей в океане	45
Кравцов С., <u>Резник Г.М.</u> Квазигеострофические вихри на равномерном зональном течении: эффекты галилеевой неинвариантности уравнений вращающейся мелкой воды	46
<u>Кривоносова О.Э.</u> , Жиленко Д.Ю. Фазовая синхронизация турбулентных течений при периодической модуляции скорости вращения	47
<u>Курганский М.В.</u> О неустойчивости инерционно-гравитационных волн конечной амплитуды	48
<u>Малиновская Е.А.</u> , Малиновский Д.Р. Исследование влияния теплового переноса в каналах сыпучей разогретой среды на ветровой вынос	49
Малиновская Е.А., <u>Петросянци М.Т.</u> Проблема генерации распределенных полей поверхностного источника песчано-пылевого аэрозоля	50
<u>Малиновская Е.А.</u> , Чхетиани О.Г. Роль микроструктуры поверхности при эоловом выносе	51
<u>Пелиновский Е.Н.</u> , Талипова Т.Г., Диденкулова Е.Г. Дисперсионное сжатие слабонелинейных волновых пакетов	52
<u>Пережогин П.А.</u> , Глазунов А.В. Параметризации подсеточной квазидвумерной турбулентности класса LES, ориентированные на применение в моделях океана промежуточного разрешения	53
<u>Перов В.Л.</u> , Ефремов С.В., Никитин М.А. Применение спектрального алгоритма для вычисления коэффициентов турбулентности в модели COSMO-Ru при прогнозировании устойчивых ситуаций	54
<u>Ривин Г.С.</u> , Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полухов А.А., Ревокато	

ва А.П., Татаринович Е.В., Чурюлин Е.В. Система COSMO-Ru краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: состояние и перспективы развития на суперкомпьютере Cray XC40-LC “Росгидромет”	55
<u>Сухановский А.Н.</u> , Попова Е.Н. Влияние конвективных валов на процесс быстрой интенсификации циклонического вихря	56
<u>Чашечкин Ю.Д.</u> Атомно-молекулярные эффекты в геофизической гидродинамике	57
<u>Щевьев В.А.</u> Связь крупномасштабной антициклонической циркуляции в Атлантике с атмосферной циркуляцией	58

Секция III Общая циркуляция атмосферы и динамика климатической системы

<u>Александров Г.А.</u> Чувствительность амплитуды годового хода приповерхностной температуры к росту среднегодовой температуры в INM-CM5	59
<u>Александров Г.А.</u> Воспроизведение изменений годового хода приземной температуры в центральной части Русской равнины моделями климатической системы	60
<u>Александров Г.Г.</u> Оценка изменений удельного потребления тепла для отопления зданий по сценариям изменения климата, предполагаемых моделью INM-CM5	61
<u>Алексеева Е.Г.</u> , Анискина О.Г. Анализ связи стратосферной циркуляции с аномалиями температуры на Северо-западе Российской Федерации	62
<u>Бекряев Р.В.</u> Отношение сигнал/шум в задачах теории климата	63
<u>Белова И.Н.</u> , Кривенко Л.А., Докукин С.А., Фалалеева В.А. Сравнение различных биоклиматических характеристик для крупных городов России	64
<u>Благодатских Д.В.</u> , Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Оноприенко В.А., Яковлев Н.Г. Модификация климатической модели океана ИВМ РАН	65
<u>Володин Е.М.</u> Чувствительность и естественная изменчивость в климатической модели	66
<u>Губарев А.В.</u> , Аверьянова Е.А., Полонский А.Б. О влиянии Восточно-Атлантического колебания на завихренность касательного напряжения трения ветра над Черным морем в осенне-зимний период	67
<u>Дембицкая М.А.</u> , Акперов М.Г., Семенов В.А., Мохов И.И., Парфенова М.Р. Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы	68
<u>Дембицкая М.А.</u> , Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р. Циклоническая активность в Арктике и тенденции их изменений	69
<u>Денисов С.Н.</u> , Елисеев А.В., Мохов И.И. Модельные оценки вклада природных и антропогенных потоков парниковых газов в изменения климата в 21 веке	70

<u>Дианский Н.А.</u> , Багатинский В.А. Термохалинная структура вод Северной Атлантики в различные фазы Атлантической мультideкадной осцилляции	71
<u>Дианский Н.А.</u> , Сухонос П.А. Связи мод изменчивости температуры и толщины верхнего слоя Северной Атлантики с климатическими индексами	72
<u>Зароченцев Г.А.</u> , Рубинштейн К.Г. Сравнение численного прогноза дальности видимости в аэропортах Московского узла	73
<u>Зароченцев Г.А.</u> , Рубинштейн К.Г., Ткачук С.В., Игнатов Р.Ю. Анализ восстановления арктического климата с помощью глобальной и региональной модели в десятилетнем эксперименте	74
<u>Кононова Н.К.</u> Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария на фоне многолетних колебаний	75
<u>Кочин А.В.</u> Тропопауза как поверхность раздела меридианальных потоков в глобальной циркуляции атмосферы раздела воздушных масс	77
<u>Кочин А.В.</u> Переход терминатором звукового барьера как причина формирования ячейки Фаррела и «ревуших сороковых»	78
<u>Малахова В.В.</u> Численное моделирование разложения метангидратов, сформировавшихся в многолетнемерзлых породах	79
Мартынова Ю.В., Гочаков А.В., <u>Крупчатников В.Н.</u> Исследование пространственно-временных особенностей поведения характеристик неустойчивости тропосферы и нижних слоев стратосферы их реакции к возмущениям поверхности	80
<u>Матвеева Т.А.</u> , Семенов В.А. Особенности региональных изменений площади морского льда в Арктике	81
<u>Морозова С.В.</u> , Полянская Е.А., Кононова Н.К. О возможности прогнозирования климатических изменений на основе учета обратных связей	82
<u>Мохов И.И.</u> , Парфенова М.Р. Особенности изменений протяженности снежного покрова и морских льдов в связи с температурными изменениями в Северном и Южном полушариях в последние десятилетия	83
<u>Полюхов А.А.</u> , Блинов Д.В., Чубарова Н.Е. Влияние прямого эффекта аэрозольей на метеорологический режим Северной Евразии	84
<u>Полянская Е.А.</u> , Морозова С.В., Кононова Н.К. Исследование синоптических процессов на юго-востоке Русской равнины в различные климатические периоды	85
<u>Разоренова О.А.</u> , Гавриков А.Н. Влияние прохождения холодного фронта через Мозамбикский пролив на начало Индийского муссона по данным реанализов и высокоразрешающего моделирования	86
<u>Родин А.В.</u> , Зеневич С.Г., Чурбанов Д.В., Газизов И.Ш., Спиридонов М.В. Диагностика динамики стратосферы на основе гетеродинной инфракрасной спектроскопии сверхвысокого разрешения	87
<u>Рябова С.А.</u> Предварительные результаты анализа данных мониторинга температуры воздуха, проведенного в Центре геофизического монито-	

ринга г. Москвы ИДГ РАН и на Геофизической обсерватории Михнево ИДГ РАН	88
Сафронов А.Н. Влияние потепления климата и лесных пожаров на изменения растительности в бассейне озера Байкал	89
Сафронов А.Н. Палеоклимат и массовые вымирания	90
Соловьев Д.А., Нефедова Л.В. Использование методов вейвлет - анализа в изучении климата Арктического региона	91
Старченко А.В., Барт А.А., Кижнер Л.И., Одинцов С.Л., Данилкин Е.А. Численное моделирование локальных атмосферных процессов	93
Червяков М.Ю. Итоги десятилетней работы спутниковых радиометров ИКОР-М	94
Шабанов П.А. Высотные фронтальные зоны Северного полушария и роль потоков тепла от океана в их формировании	95

Секция IV Структура и состав атмосферы и перенос примесей

Аникин П.П., Исаков А.А., Губанова Д.П., Величко А.П. Анализ обратных траекторий направлений прихода воздушных масс в Подмоскowie в 2017–2019 годах	96
Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Афиногенов К.В., Гурьев А.В., Козьмина А.С. Вариабельность распределения торона в приземном слое атмосферы над сушей средних широт	97
Аржанов М.М., Денисов С.Н. Оценка эмиссий метана из наземных экосистем арктических регионов Западной Сибири	98
Артамонова М.С., Чхетиани О.Г., Лапченко В.А., Максименков Л.О. Экспериментальные исследования аэрозоля в юго-восточном Крыму в 2018–2020 годах	98
Борисов Д.В., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.Н., Лезина Е.А. Модельные расчеты концентраций PM₁₀ XTM CHIMERE с горизонтальным шагом 2 км в московском регионе	100
Боровский А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Кирсанов А.А., Пономарев Н.А., Постыляков О.В. Сравнение результатов измерений и моделирования изменчивости интегрального содержания двуокиси азота и формальдегида в пограничном слое атмосферы в Московской области	101
Виноградова А.А., Титкова Т.Б. Альbedo подстилающей поверхности и климатические параметры атмосферы в Российской Арктике весной	102
Гинзбург А.С., Семенов В.А. Влияние карантина весной 2020 года на снижения транспортной активности и качества воздуха в Москве	103
Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Дадченко О.И., Гушин Р.А. Оценка последствий переноса пылевого аэрозоля на территорию Северной Китайской Равнины	104

<u>Горчаков Г.И.</u> , Карпов А.В., Семутникова Е.Г., Копейкин В.М., Гушин Р.А., Даценко О.И., Пономарева Т.Я. Оптические и микрофизические характе- ристики аэрозоля в крупномасштабной дымной мгле	105
<u>Груздев А.Н.</u> , Елохов А.С. 30 лет зондирования вертикального распреде- ления и общего содержания NO₂ в ИФА им. А.М. Обухова РАН	106
<u>Груздев А.Н.</u> , Исаков А.А., Елохов А.С., Аникин П.П. Субмикронный аэро- золь и двуокись азота в приземном слое атмосферы на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН: 30 лет измерений	107
<u>Губанова Д.П.</u> , Скороход А.И., Минашкин В.М., Иорданский М.А. Измен- чивость приземного аэрозоля в Москве при снижении антропогенной нагрузки весной 2020 года	108
<u>Исаков А.А.</u> Микрофизические параметры приземного аэрозоля в Подмоскowie	109
<u>Казанцев В.С.</u> , Кривенко Л.А. Суточная динамика летней эмиссии метана на примере термокарстового озера Центрального Ямала	110
<u>Коновалов И.Б.</u> , Головушкин Н.А., Beekmann M. Влияние атмосферных окислительных процессов на оптические свойства и состав дымового аэрозоля: анализ спутниковых данных и моделирование	111
<u>Копейкин В.М.</u> , Артамонов А.Ю., Бубнова Е.С., Гречко Е.И., Малафеев Г.В., Новигацкий А.Н., Пономарева Т.Я., Шевченко В.П., Солная О.А., Репи- на И.А., Шишов Е.А. Вариации содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью Атлантического океана	112
<u>Кочин А.В.</u> Антициклоническая циркуляция в острове тепла	113
<u>Кременчуцкий Д.А.</u> Бериллий-7 в приземном слое атмосферы севасто- польского региона в период 2011–2016 гг.	114
<u>Кременчуцкий Д.А.</u> Свинец-214 в приземном слое атмосферы севасто- польского региона	115
<u>Кузнецова И.Н.</u> , Борисов Д.В., Кирсанов А.А., Ривин Г.С., Ткачева Ю.В., Шалыгина И.Ю. Сценарные модельные оценки вариационных измене- ний эмиссий антропогенных источников в Москве весной 2020 г. с уче- том особенностей погодных условий	116
<u>Локощенко М.А.</u> , Богданович А.Ю., Еланский Н.Ф., Гоуда К.Ч. Зависимости приземного содержания малых газов от основных метеорологических величин в городах России и Индии	117
<u>Макоско А.А.</u> , Матешева А.В. Методика оценки экологических рисков (рисков здоровью) от загрязнения атмосферы Байкальского региона в условиях изменяющегося климата	118
<u>Чубарова Н.Е.</u> , Андросова Е., Кирсанов А., Вольперт Е., Еремина И., Попо- вичева О., Ривин Г.С., Шалыгина И. Городской аэрозоль и его радиацион- ные эффекты по данным эксперимента московского AeroRadCity и дан- ным моделирования COSMO-ART	119

<u>Никитин С.В.</u> , Чуличков А.И., Боровский А.Н., Постыляков О.В. О возможности оценки характеристик аэрозоля и облачности с помощью нейронной сети по данным измерений рассеянного солнечного излучения	120
<u>Никитин С.В.</u> , Чуличков А.И., Боровский А.Н., Постыляков О.В. Об оценке характеристик рассеяния в атмосфере по спектральным измерениям солнечного излучения с использованием алгоритмов машинного обучения	121
<u>Плахина И.Н.</u> , Репина И.А. Оценки тенденций изменения межгодового и внутригодового хода аэрозольной и облачной компонент атмосферы в западной части РФ в поствулканический период (наземные, спутниковые наблюдения, реанализ)	123
<u>Пономарёв Н.А.</u> , Юшков В.П., Еланский Н.Ф. Изучение неопределенности результатов моделирования химико-транспортной модели SILAM о загрязнении приземного слоя атмосферы Москвы	124
<u>Ракитин В.С.</u> , Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Кириллова Н.С., Ракитина А.В., Штабкин Ю.А., Казаков А.В., Шилкин А.В., Джола А.В. Окись углерода в атмосфере Московского мегаполиса: долговременные тенденции, влияние климатических факторов, атмосферный перенос, эмиссии	125
<u>Савиных В.В.</u> Использование новой кроссплатформенной базы данных для накопления долгосрочных измерений ультрафиолетовой радиации и содержания озона в атмосфере на основе наблюдений на спектрофотометре Брюэра	126
<u>Ситнов С.А.</u> , Мохов И.И. Перенос в арктическую атмосферу продуктов горения сибирских лесов	127
<u>Скороход А.И.</u> , Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Губанова Д.П., Ракитин В.С., Белоусов В.А., Пономарев Н.А. Состав атмосферы в г. Москве в условиях мероприятий по нераспространению коронавирусной инфекции в марте–апреле 2020 г.	128
<u>Суханов А.Я.</u> , Бочковский Д.А. Восстановление аэрозольного отношения рассеяния при лидарном зондировании	129
<u>Шалыгина И.Ю.</u> , Кузнецова И.Н., Борисов Д.В. Экспериментальные расчеты загрязнения воздуха в Москве с имитационными эмиссиями с использованием химической транспортной модели CHIMERE	130
<u>Шалыгина И.Ю.</u> , Кузнецова И.Н., Борисов Д.В., Нахаев М.И., Лезина Е.А. Особенности сезонного хода эмиссии загрязняющих примесей кадастра ЕМЕР для расчётов химической транспортной модели CHIMERE в Московском регионе	131
<u>Штабкин Ю.А.</u> , Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Беликов И.Б., Панкратова Н.В. Источники атмосферного метана в Арктике: наблюдения и численное моделирование	132
<u>Штабкин Ю.А.</u> , Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В. Сезонные вариации приземного содержания озона в Северной Евразии: наблюдения и численное моделирование	133

<u>Штабкин Ю.А.</u> , Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Березина Е.В., Васильева А.В. Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации и региональный баланс тропосферного озона	134
<u>Юргайтис Д.Ю.</u> Тестирование модели IRI на данных измерения электронной концентрации ионосферы спутниками SWARM в 2014г.	135

*Секция V Физика атмосферного пограничного слоя со специальной подсекцией
"Исследование структуры и динамики атмосферного пограничного слоя с
использованием беспилотных летательных аппаратов"*

<u>Анисимов С.В.</u> , Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Климанова Е.В., Прохорчук А.А., Козьмина А.С., Гурьев А.В. Электричество среднеширотного атмосферного пограничного слоя: результаты синхронных наземных и аэростатных наблюдений	136
<u>Анисимов С.В.</u> , <u>Галиченко С.В.</u> , Прохорчук А.А., Афиногенов К.В. Электрическая стратификация конвективного атмосферного пограничного слоя средних широт: результаты численного моделирования и натурных наблюдений	137
<u>Артамонов А.Ю.</u> , Репина И.А., Степаненко В.М., Варенцов М.И. Исследование вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя над болотами Западной Сибири	138
<u>Банах В.А.</u> , Смалихо И.Н., Фалиц А.В. Температурно-ветровое зондирование пограничного слоя атмосферы в прибрежной зоне Байкала	139
<u>Варенцов М.И.</u> , Артамонов А.Ю., Репина И.А., Константинов П.И., Степаненко В.М., Локощенко М.А., Богомолов В.Ю., Кукова Н.Е., Варенцов А.И., Марчук Е.А., Шестакова А.А. Квадрокоптер как инструмент для мониторинга и исследования пограничного слоя атмосферы	140
<u>Вульфсон А.Н.</u> , Николаев П.В. О двух ярусной модели конвективного поверхностного слоя и модификации теории подобия Мони́на–Обухова	141
<u>Дрозд И.Д.</u> , Гавриков А.В., Степаненко В.М., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д., Варенцов М.И. Исследование динамики турбулентности в городских условиях с использованием измерений на микрометеорологической мачте	142
<u>Зайцева Д.В.</u> , Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д. О влиянии внутренних гравитационных волн разных типов на турбулентные характеристики в атмосферном пограничном слое	143
<u>Иванов Б.В.</u> , Прохорова У.В., Курапов М.В., Журавский Д.М., Уразгильдеева А.В., Сыроветников С.С., Безгрешнов А.М. Использование беспилотного летательного аппарата для исследования альbedo снежно-ледовых поверхностей	144

<u>Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г. Исследование влияния Санкт-Петербурга на распределение приземной температуры и осадков по данным многолетних измерений</u>	145
<u>Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Кузнецов Д.Д., Зайцева Д.В. Содарные наблюдения бризовой циркуляции в прибрежной зоне Черного моря</u>	146
<u>Мортиков Е.В., Глазунов А.В., Лыкосов В.Н. Прямое численно моделирование устойчиво стратифицированного турбулентного течения Куэтта</u>	147
<u>Пашкин А.Д., Репина И.А., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Смирнов С.В., Тельминов А.Е. Экспериментальные исследования характеристик атмосферной турбулентности в городском каньоне</u>	148
<u>Попов Ю.Б., Карпушин П.А., Красненко Н.П., Кураков С.А., Раков А.С. Метеорологический беспилотный летательный комплекс мультироторного типа и его использование для мониторинга атмосферы</u>	149
<u>Романовский О.А. Лидарные исследования техногенных и парниковых газов атмосферы: аппаратура и результаты</u>	150
<u>Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В. Степенной закон затухания турбулентной кинетической энергии в RANS моделировании</u>	151
<u>Фролькис В.А., Демченко П.Ф., Гинзбург А.С. Тепловой баланс покрывающего слоя в условиях городской застройки</u>	152
<u>Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Живоглотов Д.Н., Калягин М.Ю., Шевченко А.М. Беспилотный летательный аппарат для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя</u>	153
<u>Шелехов А.П., Афанасьев А.Л., Кобзев А.А., Тельминов А.Е., Шелехова Е.А., Чупина О.С. Экспериментальные исследования турбулентных флуктуаций компонент скорости и углов движений при удержании высоты беспилотным летательным аппаратом</u>	154
<u>Шестакова А.А., Чечин Д.Г. Фёновы́й эффект на Шпицбергене: влияние на структуру пограничного слоя и турбулентный теплообмен</u>	155
<u>Юшков В.П. Вероятностный прогноз ветровых порывов</u>	156

<u>Беляев А.Н. Механизм формирования локальных струйных течений на высотах нижней термосферы</u>	157
<u>Волобоев Л.А., Захаров В.И. Статистика ионосферных возмущений по данным спутниковой миссии Swarm в 2014г.</u>	158
<u>Воробьева Е., Де Карло М., Нашхолм С.П., Ля Пишон А. Новый подход к сравнению смоделированных и наблюдаемых микробаром</u>	159
<u>Горбунов М.Е., Коваль О.А. Использование функции Кирквуда для анализа радиозатменных сигналов</u>	160

<u>Губенко В.Н., Кириллович И.А.</u> Радиозондовые исследования внутренних волн в атмосфере Земли с помощью усовершенствованного метода годографа скорости ветра	161
<u>Губенко В.Н., Кириллович И.А., Андреев В.Е.</u> Определение характеристик внутренних волн в атмосферах Земли и Марса на основе анализа профилей температуры, восстановленных из радиозатменных измерений спутников CHAMP и MARS GLOBAL SURVEYOR	162
<u>Егоров Д.П., Кутуза Б.Г.</u> Флуктуации яркостной температуры атмосферы на частотах 18–27 ГГц, обусловленные тропосферной турбулентностью	163
<u>Ермакова Т.С., Погорельцев А.И., Коваль А.В.</u> Отклик динамических процессов внетропической стратосферы на разные типы положительной фазы ЭНЮК.....	164
<u>Захаров В.И.</u> Волновые проявления в верхней атмосфере крупных синоптических процессов по данным дистанционных и контактных методов	165
<u>Кан В., Горбунов М.Е., Шмаков А.В., Федорова О.В., Софиева В.Ф.</u> Параметры внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды сигнала в спутниковом радиозатменном эксперименте	166
<u>Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Ермакова Т.С., Ефимов М.М.</u> Внезапное стратосферное потепление: численное моделирование глобальных волн и остаточной меридиональной циркуляции	167
<u>Медведева И.В.</u> Исследование температурного режима области мезопавзы по наблюдениям гидроксильного излучения в Восточной Сибири	168
<u>Рябова С.А., Шалимов С.Л.</u> Спектральный анализ геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 8 суток до 17 суток	169
<u>Рябова С.А., Шалимов С.Л.</u> Исследование проявления атмосферных волн во временных вариациях геомагнитного поля (обсерватория "Бельск") и ионосферной критической частоты F2-слоя (ионосферная станция "Варшава")	170
Софиева В.Ф., Далодье Ф., Хочкорн А., <u>Кан В.</u> Температурные профили высокого разрешения, восстановленные по измерениям бихроматических мерцаний звезд фотометрами GOMOS/Envisat	171
<u>Юсупов Ю.И.</u> Использование мезомасштабных диполей потенциального вихря для прогноза глубокой влажной конвекции	172
<u>Якушкин И.Г.</u> О некоторых общих проблемах теории распространения волн и геофизической гидродинамики.....	173