



Всероссийская конференция с международным участием,  
посвященная памяти академика  
Александра Михайловича Обухова

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

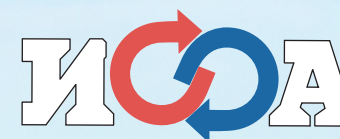
Тезисы докладов



The International Conference  
dedicated to the memory of academician A.M.Obukhov

**TURBULENCE,  
ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS**

Abstracts



Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
Москва, 22 - 24 ноября 2022

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

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

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ,  
ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ  
И КЛИМАТА**

22 – 24 ноября 2022 года  
Сборник тезисов

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

**TURBULENCE,  
ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS**

**22-24 November 2022  
Abstracts**

МОСКВА  
ФИЗМАТКНИГА  
2022

ББК 26.23  
Т 864  
УДК 551.5

Редколлегия:

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

**Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА». 22–24 ноября 2022 года. Проводится в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220 и Соглашения № 075-15-2021-577 от 03.06.2021 о выделении гранта Минобрнаукой. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2022 - 210 с. ISBN 978-5-89155-369-9**

**The Conference dedicated to the memory of Academician Alexander Mikhailovich Obukhov “TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS” 22-24 November 2022. Book of Abstracts. Moscow. Fizmatkniga Publisher, 2022. 210 p.**

*Научное издание*

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ,  
ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ  
И КЛИМАТА

Всероссийская конференция,  
посвященная памяти академика  
Александра Михайловича Обухова

22–24 ноября 2022 года

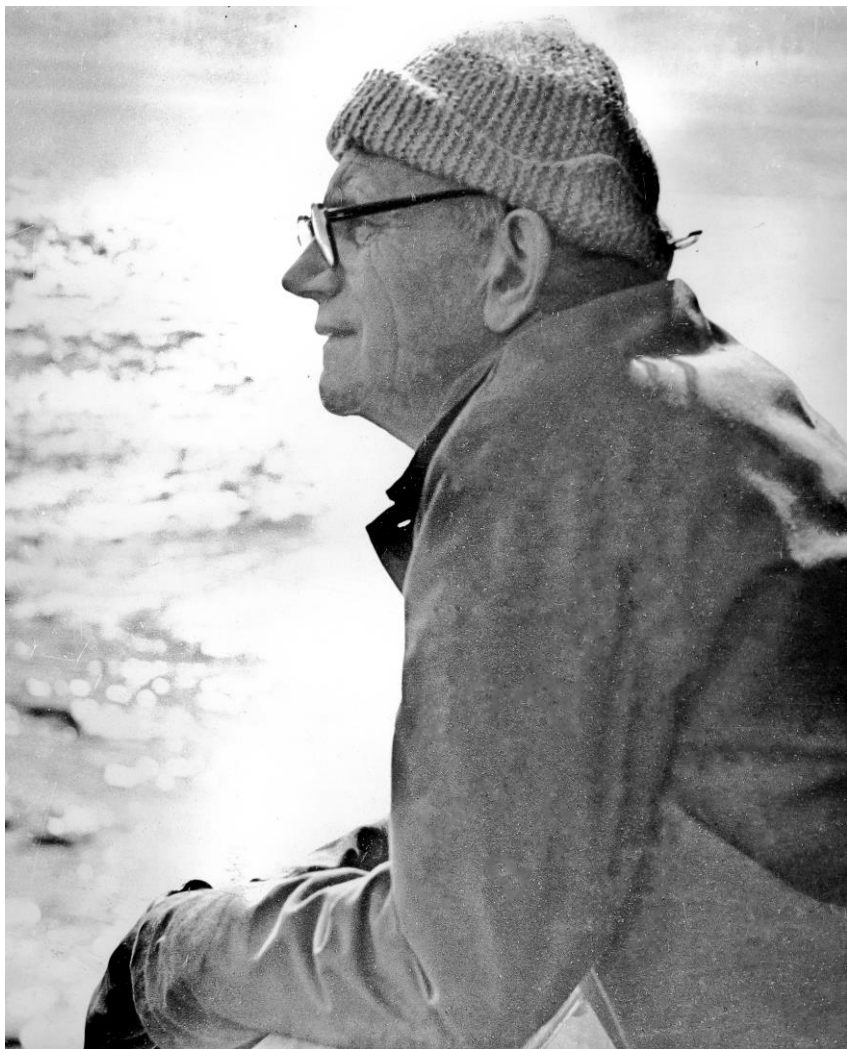
Сборник тезисов

Подписано в печать \_\_\_\_.

Формат 60х90 1/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. 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**

Г.С. Голицын, академик, ИФА РАН – сопредседатель  
И.И. Мохов, академик, ИФА РАН/ МГУ им. М.В.Ломоносова – сопредседатель  
Р.М. Вильфанд, д.т.н., Гидрометцентр РФ  
В.П. Дымников, академик РАН, ИВМ РАН  
Н.Ф. Еланский, чл.-корр. РАН, ИФА РАН  
А.В. Елисеев, д.ф.-м.н., профессор РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова  
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  
А.А. Макоско, чл.-корр. РАН, Президиум РАН  
Е.А. Мареев, академик, РАН, ИПФ РАН  
М.Я. Маров, академик РАН, ИПМ РАН  
М.А. Носов, д.ф.-м.н., профессор РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова  
В.А. Семенов, академик РАН, ИФА РАН  
Ю.Д. Чашечкин, д.ф.-м.н., ИПМех РАН  
О.Г. Чхетиани, д.ф.-м.н., ИФА РАН

**Организационный комитет**

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

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

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

А.Ю. Артамонов, ИФА РАН

М.С. Артамонова, ИФА РАН

И.Н. Белова, к.ф.-м.н., ИФА РАН

Н.В. Вазаева, к.ф.-м.н., ИФА РАН

Л.Д. Краснокутская, к.г.н., ИФА РАН

В.С. Люлюкин, к.ф.-м.н., ИФА РАН

В.В. Орлова, ИФА РАН

В.А. Семенов, академик РАН, зам. директора, ИФА РАН

В.А. Фалалеева, ИФА РАН

Е.И. Федорова, ИФА РАН

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

А.А. Шестакова, к.ф.-м.н., ИФА РАН

## **Вариант теории локального подобия и аппроксимация вертикальных профилей турбулентных моментов конвективного пограничного слоя атмосферы**

Вульфсон А.Н.<sup>1,2</sup>, Николаев П.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт Водных проблем РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая Школа Экономики», Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия*  
[longines1812@yandex.ru](mailto:longines1812@yandex.ru)

**Ключевые слова:** Конвективный пограничный слой. Локальная теория подобия. Полуэмпирическая теория турбулентности Прандтля

Рассмотрены вертикальные профили турбулентных моментов конвективного слоя атмосферы в условиях слабого ветра. Аппроксимация турбулентных моментов выполнена на основе варианта локальной теории подобия. Предложенная теория позволяет построить аналитические аппроксимации любых турбулентных моментов в форме алгебраических соотношений, зависящих только от двух вертикальных профилей: второго момента вертикальной скорости и пути перемешивания Прандтля. Выбор этих параметров опирается на классическую теорию Прандтля, в рамках которой коэффициент турбулентного обмена обусловлен произведением дисперсии вертикальной скорости и пути перемешивания. В принятом подходе для определения пути перемешивания использован «спектральный» подход.

Показано, что предложенные аппроксимации убедительно согласуются с натурными и лабораторными измерениями в основной части турбулентного конвективного слоя атмосферы. При этом выбранные базовые параметры значительно улучшают соответствие аппроксимаций локального подобия с экспериментальными данными.

Предложенный вариант теории локального подобия можно рассматривать как естественное дополнение теории турбулентности Прандтля, так и прямое обобщение теории подобия Монина-Обухова в условиях конвекции.

Аналитические аппроксимации локального подобия могут найти приложения при построении замыканий моментов высокого порядка в вихре разрешающих численных моделях турбулентности, а также при конструировании «mass-flux» параметризации.

## **Турбулентные потоки пылевого аэрозоля при всплесковой сальтации**

Горчаков Г.И., Чхетиани О.Г., Карпов А.В., Копейкин В.М., Гушин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В.  
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[gengor@ifaran.ru](mailto:gengor@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *опустыненные территории, пылевой аэрозоль, квазипериодическая эмиссия, вертикальный перенос, когерентные структуры, турбулентные и конвективные потоки, скорость выноса аэрозоля*

Опустыненные территории являются одним из основных источников пылевого аэрозоля. Количественные оценки интенсивности эмиссии и турбулентных потоков пылевого аэрозоля можно получить синхронными измерениями его концентрации, скорости и температуры воздуха на разных уровнях в приземном слое атмосферы. В [1,2] представлены результаты измерений указанных потоков в условиях квазинепрерывной сальтации. В настоящей работе обсуждаются результаты измерений пылевого аэрозоля с опустыненной территории для различных режимов его эмиссии, полученные в ходе полевых измерений на территории Астраханской обл. в августе-сентябре 2021 г.

Определены вертикальные турбулентные потоки и скорости выноса пылевого аэрозоля в условиях явления квазипериодической сальтации. Показано, что конвективные потоки аэрозоля обусловлены совместным действием регулярных восходящих движений в конвективной когерентной структуре пограничного слоя атмосферы и турбулентной диффузией. Вертикальные профили концентрации пылевого аэрозоля, определяемые по данным измерений в приземном слое атмосферы на четырёх уровнях - 0.3, 1.5, 3 и 6.0 м аппроксимируются степенными функциями с показателем, близким к -0.3. Для условий всплесковой эмиссии предлагается градиентный метод определения вертикальных потоков аэрозоля, использующий измеренные профили концентрации. Проведено сравнение потоков пылевого аэрозоля на опустыненной территории, полученных корреляционным и градиентным методами.

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

### ***Литература:***

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гушин Р.А. Турбулентные потоки пылевого аэрозоля на опустыненной территории // Доклады РАН. Науки о Земле, 2020, Т. 494, № 2, С. 53–57.
2. Карпов А.В., Горчаков Г.И., Гушин Р.А., Даценко О.И. Вертикальные турбулентные потоки пылевого аэрозоля // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 5. С. 565-574.

## Возмущения от крупных циклонов, регистрируемые в озоновом слое

Захаров В.И.<sup>1,2,3</sup>, Сигаев П.К.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

[sigachevpetr@gmail.com](mailto:sigachevpetr@gmail.com)

**Ключевые слова:** турбулентность, атмосфера, озон, тропические циклоны, ионосфера

Зарождение и эволюцию тайфунов и циклонов (ТЦ) можно рассматривать как большое турбулентное движение в атмосфере Земли, чье описание связано с проблемой передачи энергии в приземном слое. Процессы, происходящие в нижней атмосфере Земли значительно влияют на состояние верхней атмосферы. Такие явления как ТЦ происходят с выделением большого количества энергии, избыток которой выносится из области возмущения различными механизмами, в том числе и волновыми. Доказано возбуждение колебаний высотного (ВРО) и общего содержания озона (ОСО) под действием волн от тропических циклонов [1,2]. В ряде случаев акустико-гравитационные и внутренние гравитационные волны, генерируемые ТЦ [1], оказывают влияние на атмосферу в виде модуляции параметров озонового слоя на высотах стратосферы и передают возмущение выше, на высоты ионосферы [3].

В нашей работе для анализа параметров излучаемых ТЦ волн была использована методика, изложенная в [1]. Анализ возмущений озонового слоя проводился с применением данных, полученных от спектро радиометра AIRS, установленного на борту спутника Aqua [4]. Выполнен анализ 30 внетропических циклонов, действовавших на Дальнем Востоке в 2018–2020 г.г.

Результаты соответствуют характерным особенностям, указанным в [2] и заключаются в вариациях ОСО по отношению к соседним зонам вокруг исследуемых циклонов. В 3 случаях отмечалась понижение ОСО, во всех остальных – значительное повышение, достигающее 50% равновесных значений. Проведенный анализ топологии пространственных аномалий ОСО как области промежуточного уровня распространения возмущений по данным [4] и методики [2] позволяет решить задачу идентификации возмущения в озоновом слое.

Указанные явления можно рассматривать как результат воздействия акустико-гравитационных волн, распространяющихся от ТЦ и действующих на высоте озонового слоя, причем возмущение может достигать и ионосферы [3]. Исследование выполнено при частичном финансировании РНФ (проект № 22-27-00182) и ГосЗадания МГУ (тема 01200408544).

### Литература:

1. Drobyazko I.N., Krasil'nikov V.N. Generation of acoustic-gravity waves by atmospheric turbulence// Radiophys.&Quant.Elect., 1985, v. 28, N 11, 946–952.
2. Нерушев А. Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой земли. Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2003, 223с.
3. Zakharov V. I., Sigachev P.K. Ionospheric disturbances from Tropical cyclones // Advances in Space Research, 2022. v.69, Iss. 1, p.132-141.doi:10.1016/j.asr.2021.09.025.
4. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>

## **Атмосферная турбулентность, влияющая на полеты воздушных судов, и подходы к ее прогнозированию**

Иванова А.Р., Комасько Н.И., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А.

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия*  
[ivanova@ecom.ru](mailto:ivanova@ecom.ru)

**Ключевые слова:** влияние турбулентности на авиацию, виды атмосферной турбулентности, наблюдения за турбулентностью, прогноз турбулентности, глобальная модель ПЛАВ, модель COSMO-Ru6ENA

Воздушные суда (ВС) на всех этапах полета подвержены влиянию различных типов атмосферной турбулентности. Это механическая, термическая, орографическая турбулентность, турбулентность, связанная со струйными течениями и турбулентность спутного следа. Степень влияния турбулентности на полет ВС позволяет отнести ее к опасным явлениям, прогноз которых имеет важное значение во избежание потенциального летного происшествия вследствие потери управляемости воздушным судном. Излагаются подходы к прогнозированию авиационной турбулентности на различных пространственных и временных масштабах, обсуждаются виды наблюдений за атмосферной турбулентностью в целях обеспечения авиационной безопасности при использовании контактной и дистанционной аппаратуры. Описываются различные метрики для определения степени воздействия турбулентности на ВС. Формулируются требования Международной организации гражданской авиации (ИКАО) к прогнозу турбулентности с использованием пороговых значений скорости вихревой диссипации (edr – eddy dissipation rate).

Приводятся данные об оперативном прогнозировании турбулентности в Гидрометцентре России на 24 ч для целей зональных прогнозов (создание карт особых явлений для авиации на верхних и средних уровнях) на базе глобальной полулагранжевой модели ПЛАВ. Излагаются некоторые результаты разработки сверхкраткосрочного прогноза турбулентности (в том числе в вероятностной форме) над территорией Российской Федерации на основе выходных данных модели COSMO-Ru6 ENA с шагом 6.6 км.

## **Исследование стратификации микроструктуры пылевого аэрозоля на опустыненной территории**

Карпов А.В., Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Гушин Р.А., Даценко О.И.  
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[karpov@ifaran.ru](mailto:karpov@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *Пылевой аэрозоль, распределение частиц по размерам, эмиссия пылевого аэрозоля, квазипериодическая эмиссия, стратификация микроструктуры аэрозоля*

Поступающий в атмосферу с опустыненных территорий пылевой минеральный аэрозоль влияет на радиационный режим атмосферы. При дальнейшем переносе в атмосфере пылевой аэрозоль заметно трансформируется. Поэтому важно измерять характеристики пылевого аэрозоля в непосредственной близости от его источников [1,2]. В августе-сентябре 2021г. выполнены измерения функции распределения частиц пылевого аэрозоля по размерам в диапазоне от 0.5 до 5.0 мкм с помощью фотоэлектрических счетчиков ОЭАС-05 в приземном и приповерхностном слоях атмосферы на четырех уровнях 0.3, 1.5, 3.0 и 6.0 м.

Анализ показал, что измеренные распределения частиц по размерам с удовлетворительной точностью аппроксимируются степенными функциями. Установлено, что изменение наблюдаемой функции распределения частиц по размерам с высотой обусловлено, главным образом, соотношением вкладов фонового аэрозоля и аэрозоля генерируемого на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока.

При квазипериодической всплесковой эмиссии, обусловленной появлением когерентных структур в конвективном пограничном слое атмосферы микроструктуры аэрозоля, внутри ячеек с восходящими потоками определяется эмиссией с подстилающей поверхности, а в ячейках с нисходящими потоками - фоновым аэрозолем.

Выполнены синхронные измерения на высоте 1.5 м функции распределения частиц по размерам с помощью фотоэлектрического счетчика ОЭАС-0.5 в диапазоне размеров от 0.5 до 10 мкм и с помощью лазерного спектрометра ЛАС-П в диапазоне от 0.15 мкм до 0.5 мкм. Показано, что в диапазоне от 0.15 ÷ 10.0 мкм распределение частиц по размерам аппроксимируются степенными функциями.

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

### ***Литература:***

1. Mahowald N., Albani S., Kok J.F. et al. The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system // *Aeolian Research*. 2014. V. 15. P. 53-71.
2. Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kopeikin V.M., et al. Dust aerosol emission on the desertified area // *Proc. SPIE* 11560, 2020. 1156076.

## **Нелинейная динамика скользящих течений**

Кузнецов Е.А.<sup>1,2</sup>, Михайлов Е.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

[kuznetso@itp.ac.ru](mailto:kuznetso@itp.ac.ru)

**Ключевые слова:** *скользящие течения, опрокидывание, течение Прандтля, уравнение Эйлера*

Исследуется процесс опрокидывания невязких несжимаемых течений вдоль твердого тела со скользящими граничными условиями. Такие скользящие течения являются сжимаемыми, что является основной причиной формирования особенности на жесткой границе для градиента параллельной компоненты скорости. Проанализированы аналитически проскальзывающие течения в рамках двух- и трехмерных невязких уравнений Прандтля. Найдены критерии градиентной катастрофы в обоих случаях. Для 2D уравнений Прандтля опрокидывание имеет место как для параллельной скорости вдоль границы, так и для градиента завихренности. Для трехмерных течений Прандтля опрокидывание (формирование складки за конечное время) возникает для симметричной части тензора градиента скорости, а также для антисимметричной части – завихренности. Численно исследована задача о формировании градиентов скорости для течений между двумя параллельными пластинами в рамках двумерных уравнений Эйлера. Показано, что максимальный градиент скорости экспоненциально растет во времени на жесткой границе при одновременном росте градиента завихренности по дважды экспоненциальному закону. Тщательный анализ показал, что этот процесс есть не что иное, как формирование складки, со степенной зависимостью между максимальными градиентом скорости и его шириной:  $\max |u_x| \propto \ell^{-2/3}$ .

## Математические модели ламинарно-турбулентного перехода в сдвиговых течениях вязкой жидкости

Приймак В.Г.

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

[VGPRYMAK@MAIL.RU](mailto:VGPRYMAK@MAIL.RU)

**Ключевые слова:** переход к турбулентности, навье-стокса уравнения, пространственная перемежаемость, симметрия

Напорные течения вязкой несжимаемой жидкости в круглой трубе представляют собой канонические сдвиговые течения с докритическим переходом к турбулентности. В экспериментальных [1,2], численных [3-5] и обзорных [6] работах (список неполон) установлено, что при числах Рейнольдса  $1760 \lesssim Re \lesssim 2700$ , основанных на средней скорости течения и диаметре трубы, течения становятся пространственно перемежаемыми с нерегулярным чередованием ламинарного потока и турбулентных пятен, обычно называемых клубами (puffs) и пробками (slugs). В настоящей работе турбулентные пятна описываются численными нестационарными решениями трехмерных уравнений Навье-Стокса. Мы показываем, что при заданном  $Re$  (заданном расходе жидкости) существуют различные решения уравнений Навье-Стокса, отличающиеся разными значениями среднего градиента давления. Рассчитана также детальная картина движения жидкости через ламинарно-турбулентный интерфейс в перемежаемой области. Расчеты проведены преимущественно в стандартной математической модели трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, записанных в цилиндрических координатах  $(r, \varphi, x)$ . Модель включает в себя периодичность скорости по  $x$ , постоянный расход (или постоянный средний градиент),  $2\pi$ -периодичность скорости по  $\varphi$ . Предполагается также, что уравнения удовлетворяют подходящим условиям регулярности при  $r = 0$ . Так как расчеты по упомянутой модели очень затратны, то рассматриваются возможности ее упрощения, ограничивающие динамику зеркальной и вращательной симметриями скорости. Показано (см. также [7]), что в обоих случаях переходные и турбулентные течения не могут быть правильно рассчитаны, что делает недостаточно обоснованным использование ограничений симметрии при построении более простых моделей турбулентности.

### Литература:

1. Reynolds O. // Philos. Trans. Roy. Soc. London Ser. A. 1883. V.174. P.935.
2. Mukund V., Hof B. // J.Fluid Mech. 2018. V.839. P.76-94.
3. Priymak V.G., Miyazaki T. // Phys. Fluids. 2004. V.16. P.4221.
4. Avila K., Moxey D., de Losar A., Avila M., Barkley D., Hof B. // Science. 2011. V.333. P.192.
5. Priymak V.G. // Phys. Fluids. 2018. V.30. 064102.
6. Barkley D., // J. Fluid Mech. 2016. V.803. , P1.
7. Приймак В.Г. // Доклады РАН 2021. Т.500. С.53.

## **Вклад турбулентных потоков в таяние поверхности ледников архипелага Шпицберген, расположенных ниже современной снеговой линии**

Прохорова У.В.<sup>1</sup>, Терехов А.В.<sup>1</sup>, Иванов Б.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

[yliwa@rambler.ru](mailto:yliwa@rambler.ru)

**Ключевые слова:** *шпицберген, горный ледник, абляция, тепловой баланс, моделирование*

По результатам исследований проводимых на основе данных полученных в 2019 г. и 2021 г. на леднике Альдегонда (о. Западный Шпицберген) основным источником энергии, расходуемой на таяние, является коротковолновый баланс - 89%, на турбулентные потоки приходится 11%. При оценке внутрисезонной изменчивости компонентов баланса, было выявлено несколько случаев, когда роль турбулентных потоков тепла значительно возрастала. Эти события носили эпизодический характер и длились от одного дня до недели, на них приходилось до 60% общего суточного притока энергии в августе и сентябре, когда солнечная радиация была низкой. Сумма всех положительных потоков энергии за время наблюдения равна 1086,8 МДж, из них турбулентные потоки за 7 эпизодов дали 103,7 МДж.

Причиной не являлись феновые ветры, которые могут наблюдаться в рассматриваемом регионе: направление ветра соответствует общей атмосферной циркуляции; не произошло падения влажности воздуха; явления не характеризуются потеплением воздуха.

Погодные условия, одинаковые для всех событий, - сильный ветер и повышенная скорость порывов ветра в одном преобладающем направлении. Анализ синоптической обстановки в дни событий показал, что во всех наблюдаемых случаях либо проходил циклон, либо ложбина циклона к западу от побережья Шпицбергена. Это вызывало сильные южные и юго-восточные ветры. Таким образом, можно сделать вывод, что основной причиной значительного увеличения турбулентных потоков над Альдегондой была циклоническая активность.

Поскольку причиной является фактор регионального масштаба, то его влияние распространяется на все ледники, расположенные вдоль западного побережья Шпицбергена. Анализ повторяемости ветров на станции Баренцбург показывает бимодальное распределение: первая мода – ветры северных направлений, вторая мода – ветры южных и ю-ю-в направлений, для которых характерны большие скорости. Это может продлить осеннее таяние поверхности ледника и уменьшить накопление твердых осадков.

## Арт объекты Эрбу и крупномасштабные квазидвумерные турбулентные структуры

Рыскаленко П.Р.<sup>1</sup>, Малиновская Е.А.<sup>2</sup>, Чхетиани О.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГБОУ "Школа №814", Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[elen\\_am@inbox.ru](mailto:elen_am@inbox.ru)

**Ключевые слова:** турбулентные структуры, техника Эрбу, степенные законы Колмогорова

При турбулентном движении потока возникают структуры разного размера, которые визуально видны в различных физических процессах: обтекание поверхностей, пылевые структуры при извержении вулкана, спиральные вихри на морской поверхности и т.д. Внешне подобные структуры обнаруживаются и в изобразительном искусстве. Более того, известны исследования, находящие связи между объектами на картинах Ван Гога или абстрактной живописи со степенными законами Колмогорова [1].

Большое разнообразие самоподобных структур обнаружилось в графических объектах, полученных в технике Эрбу, где краски наносятся изначально на поверхность воды с последующим переносом полученного после изображения на бумагу.

Нами были проведены два вида экспериментов с перемешиванием красок на поверхности в соответствии с техникой Эрбу, но с дополнительными внешними воздействиями: влиянием воздушного потока и создаваемой в начальный момент времени разности температур.

Воздушный поток со скоростью от 3 до 3.6 м/с над раствором жидкости в прямоугольной емкости способствует появлению одного или двух крупных вихрей, состоящих из более мелких вихрей.

Для цифрового варианта рисунков выбраны области с явным узором в форме вихря. Для азимутальных средних, считаемых радиально от центра структуры, как в [2], проведен статистический анализ изменения насыщенности цвета от расстояния, построены спектральные функции, определены степенные показатели наклона.

Для движения в кювете в полученных рисунках отмечаются структуры со степенями близкими к -1 – -0.7. При обтекания препятствия за «холмом» в области рециркуляции степень наклона спектра варьируется от -1.2 до -0.8.

Для конвективных движений, возникающих при установлении разности температур между центральной областью (около 100°C) и охлажденным до 0°C раствором. В результате тепловых волн, равномерно распределенная по поверхности краска структурируется, фрагментируется. Структуры также дают степенной спектр с показателями, меняющимися от -3 до -1.

### Литература:

1. Aragón J. L. et al. Turbulent luminance in impassioned van Gogh paintings //Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2008. – Т. 30. – №. 3. – С. 275-283.
2. Beattie J., Kriel N. Is The Starry Night Turbulent? //arXiv preprint arXiv:1902.03381. – 2019.

## **О турбулентном потоке вихря в приземном слое атмосферы**

Соленая О.А., Шишов Е.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В., Копров В.М.  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[Solenaya.Oksana@gmail.com](mailto:Solenaya.Oksana@gmail.com)

**Ключевые слова:** турбулентность, завихренность, спиральность, пограничный слой, методы измерений

Интерес к завихренности обусловлен рядом причин. Вихрь - наиболее типичная структурная единица турбулентного течения. Квадрат завихренности (энстрофия) в турбулентности непосредственно связан с диссипацией турбулентной энергии, обеспечивающей каскадный процесс.

Прямые методы измерения завихренности методами термоанемометрии реализуются исключительно в лабораторных условиях. Для измерения завихренности в реальной атмосфере был разработан ряд косвенных подходов, в частности, с измерениями циркуляции по контуру. Первые экспериментальные исследования циркуляции начаты в ИФА в 70-е гг В.М. Бовшверовым и др. [1]. Впервые в мире были проведены измерения турбулентной спиральности (скалярного произведения скорости на завихренность) в АПС [2]. В 2012, 2014 гг. был предложен градиентный метод измерения циркуляции на базе анемометров, размещенных в вершинах тетраэдра [3,4]. Была отмечена тесная связь спиральности с характеристиками локальных ветров [5].

В 2019-2020 гг. в ИФА впервые была предложена оригинальная пространственная схема 3-компонентного акустического циркулиметра, реализованная на новой элементной базе. В настоящей работе приведены результаты экспедиционных измерений циркуляции в приземном слое атмосферы, полученные на базе Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН в 2021, 2022 гг. и аридных условиях Калмыкии в 2022 г.. Циркулиметры вместе с анемометрами размещались на высотах 2, 10 и 30 м. Получены спектры циркуляции, энстрофии, спиральности и ее флуктуаций. Рассчитаны компоненты тензора турбулентного потока вихря – корреляции компонент скорости и завихренности. Это понятие было впервые отмечено в [6]. Его диагональные элементы связаны со спиральностью. Недиagonальные компоненты позволяют определить и оценить характеристики турбулентной вязкости\диффузии и ветровых сдвигов. Рассматриваются связи измеренных величин с параметрами атмосферной устойчивости.

### **Литература:**

1. Бовшверов В.М. и др. Изв. АН СССР. ФАО. 1971. Т. 7, № 4. С. 371-376.
2. Копров Б.М. и др. ДАН. 2005. Т. 403. № 5. С. 627-630.
3. Копров Б.М. и др. Изв. РАН. ФАО. Т. 51. №6. с. 637–647. 2015.
4. Копров Б.М. и др. Изв. РАН. ФАО. Т. 54. № 5. С. 525-537. 2018.
5. Chkhetiani O.G. et. al. Bound.Lay. Meteo. V. 168 Iss. 3 P. 361-385. 2018.
6. Новиков Е.А. Изв. АН СССР. ФАО. 1972. Т. 8, № 7. С. 759-762.

## О диапикническом перемешивании на континентальном склоне в северо-западной части Японского моря

Степанов Д.В.<sup>1</sup>, Островский А.Г.<sup>2</sup>, Лазарюк А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[step-nov@poi.dvo.ru](mailto:step-nov@poi.dvo.ru)

**Ключевые слова:** диапикническое перемешивание, двойная диффузия, сдвиговая неустойчивость, Японское море

Диапикническое перемешивание количественно оценивается на континентальном склоне в зоне интенсивного Приморского течения в северо-западной части Японского моря. Представлен анализ процессов: сдвиговой неустойчивости/турбулентности, обусловленной слабо-нелинейным взаимодействием внутренних волн, и двойной диффузии (диффузионная конвекция и солевые пальцы), которые ответственны за интенсивное вертикальное перемешивание. На основе данных профилирования высокого вертикального разрешения с конца весны до начала осени 2015 г [2] и в рамках нескольких подходов получены оценки вертикальных потоков плавучести, обусловленных процессами турбулентности [1] и двойной диффузии [3]. Установлено, что интенсивное диапикническое перемешивание благодаря процессам двойной диффузии зарегистрировано в приповерхностном слое от 60 до 150 дбар, в то время как турбулентность вносит наибольший вклад в это перемешивание в нижележащих слоях. В тоже время, с середины весны до начала мая, обнаружено, что диффузионной конвекцией охвачен слой от 60 до 220 дбар. Полученные оценки потоков плавучести подтверждают, что процессы двойной диффузии могут играть ведущую роль в формировании диапикнического перемешивания.

### **Литература:**

1. Gregg, M.C. Scaling turbulent dissipation in the thermocline / M.C. Gregg // J. Geophys. Res. – 1989. – Vol. 94. – P. 9686–9698.
2. Turbulent mixing and its contribution to the oxygen flux in the northwestern boundary current region of the Japan/East Sea, April–October 2015 / A. Ostrovskii, D. Stepanov, D. Kaplunenko [et al.] // J. Marine Sys. – 2021. – Vol. 224. – P. 103619.
3. Radko, T. Double-Diffusive Convection / T. Radko. – N.Y.: Cambridge University Press. 2013. – 342 p.

## **Мезомасштабная динамика и вихревой перенос тепла в Японском море**

Степанов Д.В.<sup>1</sup>, Кузнецова Н.В.<sup>1</sup>, Фомин В.В.<sup>2</sup>, Гусев А.В.<sup>2,3</sup>, Дианский Н.А.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия*

<sup>2</sup>*Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*  
[step-nov@poi.dvo.ru](mailto:step-nov@poi.dvo.ru)

**Ключевые слова:** мезомасштабная динамика, вихревой перенос тепла, численное моделирование, Японское море

Изучение циркуляции Мирового океана (МО) на все более мелких масштабах сталкивается с трудностями в проведении инструментальных измерений и ростом вычислительных затрат. Циркуляция Японского моря представляет собой миниатюрную копию МО, поскольку близко отражает особенности его крупномасштабной циркуляции [1]. Изучение циркуляции на различных масштабах на примере этого бассейна позволит расширить наше представление об особенностях циркуляции МО. Особенности мезомасштабной динамики и оценки вихревого переноса тепла в бассейне ЯМ изучались на основе ретроспективного численного моделирования, выполненного с помощью программного комплекса INMOM-ERA-Interim [2] на вихре-разрешающем пространственном разрешении (1/20 градуса по широте и долготе). Интервал интегрирования охватил период с 1990 по 2010 гг. Раскрыты основные механизмы генерации вихревой кинетической энергии к которым относится не только бароклинная, но и баротропная неустойчивости крупномасштабной циркуляции, а также вихревая составляющая работы ветра. Подтверждены предположения о «проницаемости» Субполярного фронта и установлены основные пути меридионального переноса тепла, обусловленного мезомасштабной динамикой, с южной в северную часть Японского моря [2].

### **Литература:**

1. Gamo, T. Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea / T. Gamo // Geophys. Res. Lett. – 1999. – Vol. 26. – P. 3137–3140.
2. Mesoscale Dynamics and Eddy Heat Transport in the Japan/East Sea from 1990 to 2010: A Model-Based Analysis / D. Stepanov, V. Fomin, A. Gusev, N. Diansky // J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 10. – P. 33.

## **Турбулентное перемешивание и его вклад в вертикальные потоки тепла, соли и кислорода в северо-западной части Японского моря в апреле-октябре 2015 г.**

Степанов Д.В.<sup>1</sup>, Островский А.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия

[step-nov@poi.dvo.ru](mailto:step-nov@poi.dvo.ru)

**Ключевые слова:** турбулентное перемешивание, тонкоструктурная параметеризация, инструментальные измерения, Японское море

Японское море - хорошо вентилируемый и богатый кислородом бассейн в северо-западной части Тихого океана. Однако, количественных оценок интенсивности вертикального перемешивания, основанных на инструментальных измерениях, все еще катастрофически мало. Впервые, с помощью профилографа "Аквалог" [1] удалось провести продолжительные одновременные измерения температуры, электропроводности, растворенного кислорода и скорости течений на континентальном склоне в северо-западной части Японского моря. Полученные вертикальные профили диссипации кинетической энергии турбулентности и вертикального коэффициента турбулентного перемешивания. Для оценки этих величин была использован подход тонко-структурной параметеризации, в основе которого лежит предположение о ведущей роли слабо-нелинейного взаимодействия внутренних волн. Выявлены вариации интенсивности турбулентного перемешивания от сезона к сезону и рост интенсивности перемешивания с глубиной. Зарегистрировано увеличение интенсивности турбулентного перемешивания при прохождении через станцию мезомасштабных вихрей [2].

### ***Литература:***

1. Автономный Мобильный Аппаратно-Программный Комплекс Вертикального Зондирования Морской Среды На Заякоренной Буйковой Станции / А.Г. Островский, А.Г. Зацепин, В.А. Соловьев [ и др.] // Океанология. – 2013. – Т. 53. – С. 259–268.
2. Turbulent mixing and its contribution to the oxygen flux in the northwestern boundary current region of the Japan/East Sea, April–October 2015 / A. Ostrovskii, D. Stepanov, D. Kaplunenko [et al.] // J. Marine Sys. – 2021. – Vol. 224. – P. 103619.

## **Нестационарные взаимодействия атмосферы и моря на малых и субмезомасштабах**

Чухарев А.М., Павлов М.И.

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*  
[alexchukh@mail.ru](mailto:alexchukh@mail.ru)

**Ключевые слова:** *приповерхностный слой моря, нестационарная модель, турбулентность, вертикальный обмен, натурные измерения, скорость диссипации*

Возросшая потребность в оперативных и долговременных прогнозах погоды создает повышенные требования к моделированию состояния приповерхностного слоя атмосферы, что невозможно без учета взаимодействия с подстилающей поверхностью. Процессы переноса энергии и импульса от атмосферы к океану и обратно часто нестационарны и сложным образом связаны с крупномасштабной циркуляцией обеих сред. Моделирование этих процессов остается не до конца решенной задачей во многом из-за сильного осреднения, которое приходится делать в большинстве моделей.

Проводимые отделом турбулентности Морского гидрофизического института исследования в прибрежной зоне Черного моря направлены на изучение зависимости интенсивности турбулентного обмена в приповерхностном слое от определяющих параметров. Для исследования мелкомасштабных турбулентных процессов в морской среде используется разработанный в МГИ позиционный вариант измерительного комплекса «Сигма-1».

Для описания динамики приповерхностного слоя предлагается нестационарная модель, в которой, кроме стандартных составляющих баланса турбулентной энергии, в уравнение добавлены члены, описывающие турбулентный перенос волновой кинетической энергии и генерацию турбулентности циркуляциями Ленгмюра.

Сопоставление модельных и натурных данных показывает их хорошее соответствие в достаточно широком диапазоне гидрометеорологических условий. Учет нестационарности, в частности, потока импульса из атмосферы приводит к более значительной турбулизации морской среды при равных средних скоростях ветра.

Работа выполнена в рамках госзадания FNNN-2021-0004 при поддержке гранта РНФ №22-17-00150.

## Исследование турбулентности в атмосферном пограничном слое с использованием БПЛА и акустического анемометра

Шелехов А.П.<sup>1</sup>, Афанасьев А.Л.<sup>2</sup>, Кабанов М.М.<sup>1</sup>, Кобзев А.А.<sup>1</sup>, Шелехова Е.А.<sup>1</sup>, Поплевина О.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

[ash1404@mail.ru](mailto:ash1404@mail.ru)

**Ключевые слова:** турбулентность, атмосферный пограничный слой, БПЛА, корреляционные функции, спектры турбулентности

В настоящей работе представлены результаты исследований продольных и поперечных компонент флуктуаций скорости ветра, измеренных дроном коптерного типа и акустического анемометра. Изучены поведение корреляционных функций и спектров турбулентности данных компонент на разных высотах в городском каньоне. Данные измерений были получены на территории ИМКЭС СО РАН в летний период времени на высотах 4 м и 30 м одновременно как с помощью квадрокоптера, так и акустического анемометра. По измеренным корреляционным функциям и спектрам рассчитаны коэффициенты корреляции и продольные и поперечные масштабы турбулентности. Показано, что корреляционные функции и спектры турбулентности, измеренные с помощью квадрокоптера, в целом совпадают с объективными данными об атмосфере, полученные с использованием акустического анемометра. Сравнение значений масштабов турбулентности, показывают, что они также совпадают в пределах статистической ошибки.

Основываясь на двумерной модели квадрокоптера проведено численное моделирование парения квадрокоптера в турбулентной атмосфере. Показано, что идеальное парение квадрокоптера [1, 2] происходит в случае линейной реакции квадрокоптера на внешний квазистационарный сигнал, который определяется турбулентным потоком скорости ветра. Установлено, что в случае сильной турбулентности в спектре полетных логов кроме вклада, который определяется крупномасштабными вихрями, появляются высокочастотные колебания. В результате чего углы тангажа и вращения не совпадают с турбулентными флуктуациями скорости ветра в высокочастотной области, что наблюдается в проведенных экспериментах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06066 мк.

### Литература:

1. Шелехов А. П., Афанасьев А. Л., Шелехова Е. А., Кобзев А. А., Тельминов А. Е., Молчунов А. Н., Поплевина О. Н. Использование малоразмерных БПЛА для измерения турбулентности в атмосфере. // ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2021, Т. 57, № 5, С. 611–624.
2. Shelekhov A., Afanasiev A., Shelekhova E., Kobzev A., Tel'minov A., Molchunov A., Poplevina O. Low-Altitude Sensing of Urban Atmospheric Turbulence with UAV. Drones. 2022; 6(3):61.

## **Обобщение экспериментальных данных, полученных в ходе полевых экспериментов в Ростовской области**

**Шишов Е.А., Соленая О.А., Копров В.Н., Азизян Г.В.**  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[shishov.yegor@gmail.com](mailto:shishov.yegor@gmail.com)

**Ключевые слова:** турбулентность, приземный слой, когерентные структуры, вихри, корреляционные функции

В летние сезоны 2014–2021 годов на полигоне Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН производились многоточечные измерения пульсаций направления ветра. Измерения производились 12 флюгерами, каждый из которых закреплялся на двухметровой штанге. В большинстве экспериментов флюгеры выстраивались в ряд перпендикулярно среднему ветру для определения поперечных размеров вихревых структур в воздушном потоке. При этом линейка датчиков могла охватывать от 40 до 140 метров. Характерные поперечные размеры вихрей определялись при помощи корреляционного анализа. Иногда несколько флюгеров выстраивались вдоль ветра для проверки результатов, полученных через расчет временных корреляционных функций. Это позволяло определить продольные размеры структур. В дополнение к флюгерам использовался набор малоинерционных термометров. С их помощью были получены как вертикальные, так и горизонтальные температурные разрезы. За восемь лет была собрана обширная база экспериментальных данных, позволившая получить результаты, представленные в работах [1, 2]. Ниже приведены некоторые из полученных выводов.

1. Типичные значения вихревых и термических структур лежат в пределах от 2–10 до 30–60 м и сильно уменьшаются при переходе от дня к ночи. Наибольших своих размеров вихри и термики достигают при значениях масштаба Обухова порядка –10...–30 м.
2. Условия стратификации влияют на форму вихрей. При неустойчивой стратификации продольные размеры вихрей в 1.5–2 раза превышают поперечные. При устойчивой стратификации продольные размеры меньше поперечных.
3. Долгопериодные, порядка нескольких минут, колебания температуры хорошо согласуются 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.

### **Литература:**

1. Шишов Е.А., Копров Б.М., Копров В.М. Статистические характеристики пространственно-временной изменчивости направления ветра в приземном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 23–28.
2. Шишов Е. А., Соленая О. А., Чхетиани О.Г., Азизян В.М., Копров В. М., Многоточечные измерения температуры и ветра в приземном слое // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – № 3. – С. 286–297.

## **Флуктуации скорости звука и их диссипация в атмосферном пограничном слое**

Юшков В.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[vyushkov@yandex.ru](mailto:vyushkov@yandex.ru)

**Ключевые слова:** флуктуации скорости звука, скорость диссипации, затухание флуктуаций энтропии, интегральный масштаб турбулентности

По данным натурных измерений в пограничном слое интегральные временной и пространственный масштабы турбулентных флуктуаций связываются с их кинетической и потенциально доступной (свободной) энергией и скоростями диссипации. Оценивается скорость перехода турбулентной энергии вихрей в энергию тепловых и адиабатических флуктуаций. В рамках гипотезы о скорости выравнивания мелкомасштабных флуктуаций энтропии приводятся оценки баланса кинетической энергии турбулентности. По измерениям в инерционном интервале скорость диссипации скорости звука сопоставляется со скоростью диссипации кинетической энергии и дисперсией флуктуаций скорости звука.

## **Флуктуации давления в турбулентной атмосфере**

**Юшков В.П.<sup>1,2</sup>, Каллистратова М.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

[vpushkov@yandex.ru](mailto:vpushkov@yandex.ru)

**Ключевые слова:** *флуктуации давления, теория турбулентности, адиабатическая компонента, измерения в пограничном слое*

В докладе будет показано, что анализ флуктуаций давления в теории турбулентности должен учитывать не только вихревую (несжимаемую), но и адиабатическую компоненту. Эта компонента связывается с флуктуациями внутренней (тепловой) и потенциальной энергией лагранжевых частиц. Проводится разбор работ Лайтхилла, Захарова, Хилла и Клиффорда в свете данных современных измерений. Приведены оценки амплитуды адиабатических флуктуаций в турбулентной среде. Показано, что на больших частотах одноточечных измерений, которые в рамках гипотезы Тейлора соответствуют колмогоровскому масштабу, адиабатические флуктуации превалируют над затухающими вихревыми из-за того, что они удовлетворяют разным дисперсионным соотношениям. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 21-17-00210.

## Геофизическая и ветровая составляющие Антарктического циркумполярного течения

Багатинская В.В.<sup>1,2</sup>, Дианский Н.А.<sup>1,2,3</sup>, Гусев А.В.<sup>2,3,4</sup>, Морозов Е.Г.<sup>4</sup>, Багатинский В.А.<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[varbag38@gmail.com](mailto:varbag38@gmail.com)

**Ключевые слова:** Антарктическое циркумполярное течение, влияние ветра, термохалинный фактор, численная модель, баротропная функция тока

Был изучен вклад ветрового и термохалинного факторов в формирование средней климатической структуры Атлантического циркумполярного течения (АЦТ) с помощью численного моделирования с использованием модели общей циркуляции океана (МОЦО) INMOM в режиме диагноза-адаптации. Исследования проводились для летних (февраль) и зимних (август) условий. Струя АЦТ, вызванная термохалинными факторами, ограничивается в приповерхностном слое температурным диапазоном  $\sim 0-6^{\circ}\text{C}$  зимой и  $\sim 3-9^{\circ}\text{C}$  летом. В приповерхностном слое АЦТ поворачивается влево (южное полушарие) согласно теории Экмана относительно направления ветрового напряжения. Из-за более сильных ветров зимой, отклик в скорости дрейфа сильнее, чем летом. Показано, что, несмотря на сильные ветры над Южным океаном, термохалинный фактор образования АЦТ в целом намного больше, чем ветровой фактор. Тем не менее, вклад ветровой составляющей в увеличение зональной скорости в проливе Дрейка у Антарктиды может достигать в среднем 15-20% от термохалинной скорости в 20-метровом слое. Влияние дрейфовой динамики на широтное изменение средней динамической топографии (СДТ) проявляется в том, что ветер способствует уменьшению СДТ более чем на 6 см от открытых океанических областей Южного океана до Антарктиды. Влияние ветра на формирование баротропной функции тока (БФТ) более выражено, чем на СДТ. Интенсивность АЦТ из-за ветрового воздействия увеличивается в среднем на 9-11 Св в феврале и на 12-17 Св в августе. В то же время летом наибольшее усиление БФТ на 12 Св за счет ветра приурочено к сектору АЦТ к югу от Африки, а зимой на 18 Св к югу от Австралии. В проливе Дрейка ветровая составляющая возрастает меньше, чем над АЦТ в целом: на 8 Св летом и на 12 Св зимой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 22-17-00267.

## **Океанические механизмы мультидекадной изменчивости климата в атлантическом секторе Мирового океана**

Багатинский В.А.<sup>1,2,3</sup>, Дианский Н.А.<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

[vladbag38@gmail.com](mailto:vladbag38@gmail.com)

**Ключевые слова:** климат, циркуляция, АМОЦ, Северная Атлантика, АМО, объективный анализ, EN4, JRA55-do, моделирование, INMOM

Для выяснения роли термохалинных факторов в формирование климатических трендов термохалинной циркуляции в Северной Атлантике (СА) были определены вклады изменений потенциальной температуры и солёности в тренды функции тока Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ). Для этого с помощью модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) и данных электронного атласа EN4 (MetOffice, Великобритания) методом диагноза-адаптации восстанавливалась циркуляция СА за характерные периоды 1951–2017 гг., 1951–1990 гг. и 1991–2017 гг. В двух выбранных периодах 1951–2017 гг. и 1951–1990 гг. все основные особенности изменений в АМОЦ объясняются главным образом температурными изменениями, которые преобладают над солёностными. При этом наблюдаемый тренд на ослабление основного ядра функции тока АМОЦ с 1991 по 2017 гг., вызывается изменениями солёности, а на усиление основного ядра функции тока АМОЦ с 1951 по 1990 гг. вызывается изменениями потенциальной температуры. Обнаружена связь между трендами максимума функции тока АМОЦ на 38.5° N и разностями между зонально-осредненными уровнями моря на 34.5° N и 57.5° N, которые, возможно, могут использоваться в качестве индекса изменчивости функции тока АМОЦ.

Результаты экспериментов подтвердили базовые положения гипотезы Шулейкина о взаимосвязи выноса льдов и поступлением Атлантических вод в СЛО.

Обнаружено, что в чередующиеся последовательные периоды индекса АМО положительные и отрицательные температурные (и солёностные) аномалии распространяются с периодом около 60 лет по ходу движения вод в АМОЦ, опускаясь в глубинные слои океана примерно на 60°N и частично поднимаясь на поверхность на 25°N и в области экватора. По-видимому, этот механизм вносит существенный вклад при формировании фаз индекса АМО.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ № 22-17-00267.

## Трансграничный перенос аэрозоля и пыльная буря в Калмыкии осенью 2020 г.

Вазаева Н.В.<sup>1,2</sup>, Чхетиани О.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

[vazaevanv@ifaran.ru](mailto:vazaevanv@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** экстремальные события, пыльная буря, эмиссия пыли, численное моделирование

Изменения климата в последние десятилетия сопровождаются учащением возникновения условий, способствующих развитию экстремальных событий в атмосфере, к которым относятся и пыльные бури, ставшими достаточно регулярными событиями на юге России. Пыльные бури наносят значительный ущерб населению и территориям, в которых они возникают и распространяются. Резкое усиление ветра является сопутствующим фактором и может привести к дополнительным разрушениям. Опасность пыльных бурь и сложность их прогнозирования связана с внезапностью их формирования. Задача среднесрочного и оперативного прогноза их возникновения до сих пор решена не полностью, и их исследование над территорией России и сопредельных государств является актуальным.

Одним из следствий пыльных бурь является большое количество выносимого мелкомасштабного аэрозоля: поднимаясь на значительную высоту, он образует аэрозольные слои и переносится на расстояния в тысячи км. Так, осенью 2020 года пыль от мощной пыльной бури, развившейся над Калмыкией 29 сентября, 1 октября фиксировали уже на побережье Балтийского моря за 2 с лишним тысячи км. Заметные пылевые шлейфы были видны невооруженным глазом над федеральной трассой М4.

Для исследования генезиса и развития этой пыльной бури, приведшей к значительным потерям в аграрном секторе, была использована модель WRF-Chem, с учетом разработанной нами параметризации для эмиссии пыли с аридных зон при большом градиенте температур. Согласно модельным расчетам за сутки над Калмыкией поднялось до 2 кг/кг пыли с размером до 0,5 мкм. Еще через сутки в атмосферном пограничном слое на высоте до 200 м из поднятой пыли во взвешенном состоянии осталось до 0,7 кг/кг пыли. Получено хорошее совпадение для траектории трансграничного переноса пыли: движение на северо-запад, Москва 30 сентября, Прибалтика 1 октября, что с хорошей точностью верифицируется и спутниковыми изображениями аэрозольных облаков региона исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 20-17-00214).

**Волны Россби и аномалии зональных потоков в аналогах ячеек  
Хэдли и Фарреля общей циркуляции атмосферы:  
модель и эксперименты**

Гледзер Е.Б., Гледзер А.Е., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[ochkheti@gmail.com](mailto:ochkheti@gmail.com)

**Ключевые слова:** ячейки Хэдли и Фарреля, аномалии общей циркуляции, блокирование антициклонов, резонансное взаимодействие, волны Россби, транзитная неустойчивость

Проведена серия лабораторных и численных экспериментов при внесении аномалий в осесимметричное распределение поля скорости, генерируемого с помощью соответствующего распределения источников-стоков и сектора с уменьшенным полем в МГД-методе во вращающемся мелком круговом канале с наклонным дном. Секторальное уменьшение интенсивности внешнего силового воздействия в некотором интервале значений оказывает тормозящее влияние на скорость прохождения антициклонов по каналу, почти не влияя на динамику циклонов. При этом значительная часть движущихся антициклонов либо исчезает либо практически останавливается, хотя в видимой картине распространения вихрей в канале не происходило каких-либо заметных изменений в секторе, в котором осуществлялось внешнее вмешательство. Однако для осредненных характеристик поля вихря изменения заметны по всей площади канала или в отдельных его частях. Указанные аномалии можно трактовать как уменьшение интенсивности субтропической ячейки Хэдли, которое сопровождается ослаблением пассатов в каком-то секторе приэкваториальной атмосферной циркуляции и уменьшением западного переноса в средних широтах. Состояние смеси стоячих и движущихся вихрей рассмотрено на основе простой аналитической модели резонансного взаимодействия транзитных (с промежуточным максимумом скорости) мод волн Россби в сдвиговом потоке. Амплитуда стационарного фонового состояния имеет такую же зависимость от бета-эффекта, как и для известного соотношения Свердруп для функции тока поверхностного течения в океанском бассейне при исследовании западной пограничной интенсификации течений.

## Динамика экваториальных струй, генерируемых температурным фронтом

Гончаров В.П.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[v.goncharov@rambler.ru](mailto:v.goncharov@rambler.ru)

**Ключевые слова:** температурные фронтальные струи, экваториальный бета-эффект, петлевые солитоны

Изучается крупномасштабная динамика тонких струй, формирующихся на фронтальном температурном разделе под влиянием Кориолиса и силы тяжести с учетом экваториального бета-эффекта. Теоретический подход основан на использовании вариационного принципа наименьшего действия и теории возмущений с двумя малыми параметрами  $\lambda$ ,  $\epsilon$ , которые контролируют малость временных и пространственных изменений по сравнению с их характерными масштабами. В качестве последних рассматриваются полупериод вращения планеты  $T$  и деформационный радиус Россби  $L$ . Показано, что при условии  $3L\lambda/a = \epsilon^4$ , где  $\epsilon = l/L$ ,  $a$  – радиус планеты и  $l$  – ширина струи, теория возмущений в первом порядке оказывается самосогласованной и после обезразмеривания приводит к уравнениям

$$X_t Y = \partial_s \left( \frac{X_{ss}}{(X_s^2 + Y_s^2)^2} \right), \quad Y_t Y = \partial_s \left( \frac{Y_{ss}}{(X_s^2 + Y_s^2)^2} \right). \quad (1)$$

Здесь динамические переменные  $X$  и  $Y$ , будучи функциями времени  $t$  и параметра  $s$ , описывают траекторию, которая предполагается достаточно тонкой, так чтобы обеспечить неравенство  $l/L = \epsilon \ll 1$ .

В частности, показано, что уравнения (1) имеют в качестве стационарных решений, распространяющихся вдоль экватора с постоянной скоростью, так называемые петлевые солитоны. Изучение таких решений представляет интерес в виду того, что они обладают топологией, которая позволяет обеспечить механизм конвективного переноса тепла вдоль экватора.

## **Неустойчивость течений при вращательных колебаниях жидкости**

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.

НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

[jilenko@imec.msu.ru](mailto:jilenko@imec.msu.ru)

**Ключевые слова:** *вращение, неустойчивость*

Численно, с использованием трехмерных уравнений Навье-Стокса, исследованы различные виды неустойчивости течений вязкой несжимаемой жидкости в тонком сферическом слое. Рассматриваемые течения формируются под влиянием вращательных колебаний внутренней сферы относительно состояния покоя, внешняя сфера неподвижна. Установлено, что в рассматриваемом слое развиваются три вида неустойчивости, и каждому виду соответствует свой диапазон частот вращательных колебаний. Во всех трех случаях тороидальные структуры, формирующиеся на пределе устойчивости, оказываются симметричными относительно оси вращения и плоскости экватора. Так, при низких частотах колебаний наблюдаются вихри Тейлора, которые распространяются на всю ширину слоя. При высоких частотах вблизи внутренней сферы наблюдаются вихри Гертлера. Рассматриваемые виды неустойчивости при высоких и низких частотах колебаний наблюдались ранее экспериментально в тонких цилиндрических слоях. В случае промежуточных величин частот вращательных колебаний в рассматриваемом сферическом слое обнаружен другой вид неустойчивости. Этот вид неустойчивости отличается от рассмотренных ранее видов наличием двух максимумов завихренности в течение периода колебаний. Показано, что границам диапазона развития различных видов неустойчивости соответствуют локальные максимумы величины предела устойчивости.

## Течения во вращающихся сферических слоях в присутствии шума

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.

Институт механики механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

[jilenko@imec.msu.ru](mailto:jilenko@imec.msu.ru)

**Ключевые слова:** вращение, шум, неустойчивость

Представлены результаты численного исследования осесимметричных течений вязкой несжимаемой жидкости во вращающихся сферических слоях при наличии широкополосного шума. Шум вносится в течения случайными во времени колебаниями скорости вращения внутренней сферы относительно постоянного среднего значения. Рассмотрены два типа течений - с вращением только внутренней сферы, а также с вращением двух сфер с одной и той же угловой скоростью. Установлено, что в обоих случаях происходит генерация средних течений под действием шума. Обнаруженное в расчетах увеличение средней скорости течения под влиянием шума подтверждено сравнением с экспериментом. В случае вращения только внутренней сферы проведен анализ линейной устойчивости осредненных во времени течений и показано, что с увеличением амплитуды шума происходит незначительное уменьшение критического числа Рейнольдса, соответствующего пределу устойчивости.

## **Эволюции мезомасштабных вихрей океана в неоднородных баротропных течениях**

Жмур В.В.<sup>1,3</sup>, Белonenko Т.В.<sup>2</sup>, Новоселова Е.В.<sup>2</sup>, Суетин Б.П.<sup>3</sup>, Арутюнян Д.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),*

*Долгопрудный, Россия*

[zhmur-vladimir@mail.ru](mailto:zhmur-vladimir@mail.ru)

**Ключевые слова:** *мезомасштаб, вихрь, вихревое ядро, эллипсоидальный вихрь, потенциальная завихренность, геострофическое равновесие, агеострофика, фоновое течение*

В работе основное внимание уделяется режиму неограниченного вытягивания мезомасштабных вихрей океана под действием фоновых течений. Впервые предлагается карта различных типов поведения вихрей в удобных безразмерных координатах в зависимости от характеристик течения и свойств вихрей. Показано, что относительно слабые вихри в достаточно сильных деформационных потоках неминуемо вытягиваются. Рассмотрено поведение всех интересных характеристик вихря при его удлинении: скорость, циркуляция, относительная завихренность, число Россби, энергия. При удлинении вихрей энергия перераспределяется с больших масштабов (мезомасштаб) на малые (субмезомасштаб). Собственная энергия вихрей (как кинетическая, так и доступная потенциальная) затухают по мере удлинения вихревого ядра. Оценены потери энергии вихрей. Теряемая энергия возвращается в фоновое течение, что формирует обратный энергетический каскад – перераспределение энергии с малых масштабов на большие. Наконец обращает внимание на себя интересное свойство вихря – сопротивление вытягиванию при воздействии на вихрь деформирующих потоков. Показана несимметричность поведения циклонов и антициклонов в одних и тех же фоновых течениях. Важным безразмерным параметром вихря, определяющим режим его поведения в фоновых течениях, является отношение потенциальной завихренности ядра к коэффициенту деформации фонового течения. Для выживания вихря (в зависимости от знака завихренности) требуется многократное превышение потенциальной завихренности ядра вихря над коэффициентом деформации фонового течения. Другими словами, слабое неоднородное течение способно вытянуть вихрь в нитку, а противостоять вытягиванию в таком течении может только очень интенсивный вихрь. Причина такого поведения также обсуждается в работе.

## Квазигеострофическая модель потенциальной завихренности в океане с вариационным управлением

Залесный В.Б.

*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*  
[vzalesny@yandex.ru](mailto:vzalesny@yandex.ru)

**Ключевые слова:** квазигеострофическая циркуляция, двухслойная модель океана, вариационный метод, 4DVAR алгоритм, стационарный режим течений

Рассматривается новая вариационная постановка и метод решения задачи квазигеострофической динамики в двухслойном периодическом канале. Область решения задачи имитирует зону Антарктического кругового течения Южного океана. Особенностью задачи является двусвязность области ее решения (периодичность по широте). Используя разложение в ряды Фурье, задача сводится к нелинейной системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) по времени для коэффициентов Фурье и бароклиной скорости течения. Баротропная скорость течения входит в ОДУ параметрически. Двусвязность области приводит к необходимости выполнения стационарного интегрального соотношения, определяющего баротропную скорость.

Формулируется вариационная постановка задачи и предлагается численный алгоритм ее решения, близкий к технике четырехмерного усвоения данных (4DVAR). Минимизируемый функционал формулируется на основе стационарного интегрального соотношения. В вектор управления входят начальные условия для искомых функций: коэффициентов Фурье, бароклиной скорости течений. Коэффициент турбулентного обмена КГПВ может либо (1) задаваться априори, либо (2) рассчитываться, как дополнительная компонента вектора управления. Во втором случае расширяется полное вектор-решение оптимальной задачи (включающее решение прямой и сопряженной систем плюс вектор управления), и дополнительно находится коэффициент турбулентного обмена КГПВ.

Численные эксперименты проводятся для периодического канала, имитирующего акваторию АКТ в Южном океане. Изучаются характеристики стационарных режимов течений, при разных значениях модельных параметров. Расчеты показывают, что в некоторых случаях в нижнем слое может формироваться ячеистая циркуляция, вплоть до возникновения противотечения. При этом решение оптимальной задачи характеризуется низкой величиной коэффициента турбулентной вязкости и малым расходом течения в нижнем слое. Противотечение устойчиво к небольшим вариациям возмущений рельефа и коэффициента турбулентной вязкости.

## **Модель склоновых течений над термически неоднородной поверхностью**

Ингель Л.Х.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия  
<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[lev.ingel@gmail.com](mailto:lev.ingel@gmail.com)

**Ключевые слова:** склоновые течения, аналитическая модель, термические неоднородности, плотностные течения, линейные возмущения

Аналитически исследована двумерная стационарная линейная модель течений, возникающих в устойчиво/нейтрально стратифицированной среде над термически неоднородной плоской наклонной поверхностью. На нижней границе заданы отклонения температуры, гармонически зависящие от поперечной к склону горизонтальной координаты. Полученные явные аналитические решения позволяют проанализировать закономерности возникающих плотностных течений. Показано, что эти течения могут качественно различаться в зависимости от соотношений угла наклона нижней границы  $f$  и аналога числа Рэлея, в которое в качестве пространственного масштаба входит горизонтальный масштаб термической неоднородности.

Решение описывает взаимодействие двух типов течений. Один из них – термические циркуляции, существующие и над горизонтальными неоднородно нагретыми/охлажденными поверхностями. Другой тип – склоновые течения, существующие и при однородном нагреве/охлаждении наклонной нижней границы. Эти два типа течений обусловлены одними и теми же источниками – отклонениями температуры нижней границы. Например, сток тепла, связанный с охлаждением какой-то области нижней границы в рассматриваемой задаче одновременно компенсируется двумя типами адиабатических притоков тепла (нисходящих течений). Тепло в охлаждаемую область при устойчивой стратификации приносится как нисходящим склоновым течением, так и нисходящей термической циркуляцией, существующей над охлаждаемой областью и в случае горизонтальной нижней границы. Эти два механизма притока тепла находятся в состоянии «конкуренции»: чем больше тепла переносится одним типом течений, тем меньше другим. Первый тип течений преобладает при достаточно малых углах  $f$  – при условии  $\sin f \ll \cos 2/3f / R1/6$ . При выполнении противоположного неравенства более существенна роль склонового течения. Решение в последнем случае близко к модели склоновых течений Прандтля, но модулировано по горизонтали (в поперечном к склону направлении) – отслеживает вариации температуры склона.

## О движении инерционных частиц в нестационарных/неоднородных течениях

Ингель Л.Х.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[lev.ingel@gmail.com](mailto:lev.ingel@gmail.com)

**Ключевые слова:** нестационарное течение, неоднородное течение, инерционные частицы, нелинейное гидродинамическое сопротивление, аналитическая модель, атмосферные вихри, оседание

Теоретически исследуется движение тяжелых (инерционных) частиц при достаточно быстрых изменениях скорости окружающей среды (воздуха). Относящийся сюда круг задач имеет, в частности, следующие приложения:

1. Динамика тяжелых частиц/предметов (обломков, гидрометеоров, частиц почвы и т. п.), подхватываемых шквальными порывами ветра и смерчами. Как известно, один из основных факторов опасности в эпизодах с ураганными ветрами связан с быстро движущимися частицами/предметами, подхваченными ветром.
2. Динамика оседания инерционных частиц в сдвиговых течениях.
3. Движение инерционных частиц в интенсивных вихрях (смерчах, «пыльных дьяволах») в условиях сильного «центрифугирования».
4. В литературе обсуждаются возможности искусственного стимулирования нисходящих движений в атмосфере с использованием локальных источников вертикального импульса «любыми способами, в том числе при помощи сброса в облако порошков, почти вертикального подъема в облаке реактивного самолета, направленного и ненаправленного взрыва зарядов в облаках» (Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Тр. ИПГ, 1983, вып. 45, с. 31-46.). Представляет интерес вопрос, в какой степени такого типа воздействия могут влиять на перенос и распределение гидрометеоров.

В этих задачах существен нелинейный характер гидродинамического сопротивления – его зависимость от модуля скорости движения частицы относительно среды. Разные составляющие движения частицы взаимодействуют между собой, поскольку каждая из них влияет на коэффициент сопротивления. Найден эффективный способ приближенного аналитического решения ряда задач. Установлены некоторые общие закономерности динамики частиц. Один из результатов: вследствие нелинейного закона сопротивления, последнее может заметно возрастать при колебаниях частицы относительно среды (например, при прохождении интенсивной акустической волны), так что оседание частиц в поле силы тяжести может замедляться.

## **Бароклинная неустойчивость пространственно периодических течений**

**Калашник М.В., Курганский М.В., Чхетиани О.Г.**  
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[kalashnik-obn@mail.ru](mailto:kalashnik-obn@mail.ru)

**Ключевые слова:** *гидродинамическая неустойчивость, SQG модель, вассилляции*

Исследована гидродинамическая устойчивость пространственно периодических течений стратифицированной вращающейся жидкости. Геофизическими прототипами таких течений являются зональные периодические течения в атмосферах планет гигантов и системы множественных струй в океане. Исследование устойчивости выполнено в рамках дискретной поверхностной геострофической (Surface Quasi-Geostrophic, SQG) модели, содержащей два вертикальных уровня и аналогичной классической модели Филиппса. Уравнения модели сведены к удобной для анализа системе уравнений, описывающей взаимодействие баротропного и бароклинного компонентов функции тока. В рамках этой системы изучена линейная и нелинейная динамика возмущений периодических течений. Для описания динамики использован метод Галеркина с тремя базисными тригонометрическими функциями. Получены аналитические выражения для инкрементов нарастания линейных возмущений, показано, что наиболее опасные возмущения имеют длину волны порядка бароклинного радиуса деформации Россби. С привлечением метода Галеркина также показано, что экспоненциальный рост возмущений на линейной стадии развития сменяется стадией устойчивых нелинейных колебаний. Подобные колебания аналогичны нелинейным вассилляциям, обнаруженным в известных лабораторных исследованиях Хайда. В терминах эллиптических интегралов получено аналитическое выражение для периода нелинейных колебаний, показано, что для типичных значений параметров значение периода порядка месяца. В работе также предложен длинноволновой вариант дискретной SQG модели, описывающий динамику возмущений с горизонтальным масштабом много большим бароклинного радиуса Россби. Показано, что использование этого варианта значительно упрощает исследование устойчивости и приводит к асимптотически точным результатам.

## **Исследование стационарных течений и скорости затухания нестационарных течений кармановской модели с вынуждающей силой, находящихся в режиме Бетчелора**

Кострыкин С.В.<sup>1,2,3</sup>, Якушкин И.Г.,<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, Москва, Россия*

[s\\_kostr@mail.ru](mailto:s_kostr@mail.ru)

**Ключевые слова:** *экмановское трение, погранслой, кармановская модель*

Построена теоретическая модель течения кармановской модели с вынуждающей силой, находящегося в режиме Бетчелора, Данная теоретическая модель позволила получить стационарное решение задачи, а также декремент затухания решения к стационарному течению. Результаты сравнения с численным решением показывают хорошую точность результатов, полученных по теоретической модели. Также на основе данной теории предложена параметризация коэффициента экмановского трения для вынужденного течения, находящегося в режиме Бетчелора, которая может быть использована в широком диапазоне чисел Россби и Экмана.

## **Взаимодействие монопольного вихря с зональным сдвиговым течением**

Кравцов С.В.<sup>1,2</sup>, Резник Г.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>University of Wisconsin, Milwaukee, USA

[greznikmd@yahoo.com](mailto:greznikmd@yahoo.com)

**Ключевые слова:** монопольный вихрь, сдвиговое течение, взаимодействие

Исследуется взаимодействие монополя с зональным течением в рамках 1.5-слойной квазигеострофической модели с помощью численных экспериментов с сингулярными вихрями [1]. Галилеева неинвариантность этой модели приводит к тому, что равномерный поток без сдвига влияет на динамику локализованных вихрей даже в отсутствие бета-эффекта [2]. Взаимодействие вихрей со сдвиговыми течениями рассматривается в [3]. Наиболее интересный результат заключается в существовании особой широты захвата, которая «притягивает» к себе солидарные вихри и «отталкивает» противоположные. По определению вихрь солидарный (противоположный), если его завихренность совпадает (противоположна) по знаку с завихренностью фонового течения. На  $f$ -плоскости в случае течения с постоянным сдвигом и в некоторых течениях с нелинейным сдвигом широта захвата совпадает с широтой нулевой скорости зонального течения. При стремлении захваченного солидарного вихря к широте захвата его скорость стремится к нулю; в то же время противоположный вихрь быстро удаляется от линии нулевой скорости, излучая интенсивные волны Россби и постепенно ослабевая. На бета-плоскости эффект сохраняется, но динамика усложняется. Для течения с линейным сдвигом широта захвата совпадает с широтой нулевого эффективного бета-параметра. Если сдвиг постоянный, то захваченный вихрь стремится двигаться к западу со максимальной скоростью волн Россби. Если же сдвиг нелинейный, то широта захвата отлична от широты нулевого и смещена к северу (югу) от для солидарного циклона (антициклона).

Крупномасштабные зональные течения со знакопостоянным сдвигом скорости существуют в атмосферах газовых гигантов Солнечной Системы. Долгоживущие вихри на Юпитере, включая известное Большое Красное Пятно, являются солидарными, каждый из них расположен в окрестности широты нулевой скорости, и, предположительно, является результатом слияния солидарных вихрей меньшей амплитуды. Эти факты могут быть просто объяснены в рамках нашей теории.

### **Литература:**

1. Kravtsov, S. & Reznik G. M. 2019 Numerical solutions of the singular vortex problem. *Phys.Fluids* 31, 066602.
2. Kravtsov, S. & Reznik G. M. 2021 Monopoles in a uniform zonal flow on a quasi-geostrophic - plane: Effects of Galilean non-invariance of the Rotating Shallow Water equations. *J. Fluid Mech.* 909, A23.
3. Reznik G., Kravtsov S. 2021 Monopoles in a zonal flow with constant shear on a quasi-geostrophic  $f$ -plane: Effects of Galilean non-invariance // *Phys. Fluids* 33, 116606.

## Роль микропроцессов в макромоделях динамики эолового переноса

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.

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

[elen\\_am@inbox.ru](mailto:elen_am@inbox.ru)

**Ключевые слова:** эоловый перенос, сальтации, конвективный вынос, численное моделирование

Пылевой аэрозоль генерируется аридными территориями за счет ветровых [1] и конвективных процессов выноса [2]. Поток сальтирующих частиц движется вдоль склона дюны на высоте нескольких сантиметров, сдерживается силами сопротивления поверхности и вязкими силами воздуха, влияя на динамические характеристики среды [3]. Пористая неоднородно нагретая до 60-80 градусов, поверхность эолова рельефа является источником конвективных движений различного масштаба [2]. Необходимы методики обоснования включения эффектов влияния микропроцессов, реализуемых на уровне нескольких сантиметров, в модели макроуровня, для условий одной или нескольких дюн с протяженностью 20-50 м.

Средствами открытого пакета OpenFoam для двух масштабов (микро – сантиметры и макро – десятки метров) реализованы два численных эксперимента: взаимодействие воздушного потока со взвешенными в нем частицами, движущегося над рябью (микро) или дюной (макро), с использованием Лагранжево-Эйлеровой модели RANS  $k-\omega$  SST (решатель DPMFoam) и конвективное перемешивание над неоднородно нагретой поверхностью (рябь и дюны) с использованием турбулентной модели  $k-\varepsilon$  с приближением Буссинеска (решатель bouyancyPimpleFoam).

По первой задаче выявлено локальное влияние сальтирующих частиц на характеристики среды при их движении над рябью: изменения турбулентной энергии и неравномерность потока сальтирующих частиц. Указанные свойства включаются в модель перемещения частиц над дюной, так как модель ограничивает число частиц, перемещающихся над дюной.

Для второй задачи получено, что над неоднородно нагретыми структурами типа дюн (наклоненные теплые и горячие поверхности протяженностью 10 м) возникают конвективные структуры, циркулирующие движения до высоты 100 м. Для масштабов ряби размер структур варьируется от 10 до 20 см, при этом формируется слой с более высокой температурой. Его характеристики учитываются в модели в масштабе дюн. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-17-00214.

### Литература:

1. Shao Y. Physics and modeling of wind erosion. б.м. : Springer, 2009.
2. Chkhetiani O. G. et al. Dust resuspension under weak wind conditions: Direct observations and model. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012. 12(11). 5147-5162.
3. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г. Об условиях ветрового выноса частиц почвы //Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 2. С. 175-188.

## **Колебания столба жидкости в открытой скважине, подверженной ГРП**

**Насырова Д.А.<sup>1,3</sup>, Башмаков Р.А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра  
РАН, Уфа, Россия*

<sup>2</sup>*Башкирский государственный университет, Уфа, Россия*

<sup>3</sup>*Казанский федеральный университет, Казань, Россия*

[dinasyrova@mail.ru](mailto:dinasyrova@mail.ru)

**Ключевые слова:** *собственные колебания, собственные частоты, гидроудар, скважина, фильтрация жидкости, затухающие колебания, гидроразрыв пласта*

Рассмотрены собственные колебания столба жидкости в нефтяной скважине, возникающие при резком закрытии или открытии насосов скважины (гидроударе). Период колебаний, интенсивность затухания колебаний определяются протяженностью столба жидкости, ее реологическими свойствами, а также коллекторскими характеристиками призабойной зоны пласта (в частности, коэффициентами проницаемости, качеством перфорации скважины и свойствами образованных трещин ГРП). На основе математической модели, описывающей движение столба жидкости в скважине, когда ее верхний конец открыт, и фильтрацию в призабойной зоне, подверженной ГРП, получены решения задачи о собственных затухающих колебаниях столба жидкости в скважине. Получим характеристическое уравнение для определения собственной частоты колебаний. Изучены зависимости частоты и коэффициента затухания колебаний давления на различных участках скважины от значений проницаемости пласта, параметров ГРП. Построили графики этих зависимостей. Показано, что акустическая диагностика основанная на анализе собственных колебаний в скважине может служить действенным инструментом для диагностики призабойной зоны скважины. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-11-00207, <https://rscf.ru/project/21-11-00207/>.

### **Литература:**

1. Шагапов В.Ш., Башмаков Р.А., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61, № 4 (362). – С. 5 – 14.
2. Шагапов В.Ш., Галиакбарова Э.В., Хакимова З.Р. К теории акустического сканирования повреждений подземных трубопроводов // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 6. С. 1-12.

**Исследование влияния слабой поверхностной пленки  
на возникновение и распространение ветровых волн в канале  
с помощью модификации цветного шпирен-метода и  
метода цифровой трассерной визуализации**

Плаксына Ю.Ю., Пуштаев А.В., Винниченко А.Н., Уваров А.В.  
МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия  
[yuplaksina@mail.ru](mailto:yuplaksina@mail.ru)

**Ключевые слова:** ветровые волны в каналах, цветной шпирен-метод, цифровая трассерная визуализация, слабая пленка

Несмотря на многочисленные исследования возникновения и распространения ветровых волн (см. например [1,2]), до сих пор отсутствует единая теория, описывающая эти процессы. Одной из причин является неучитывание слабой поверхностной пленки, возникающей даже в дистиллированной воде за счет малых примесей. Несмотря на малую прочность, такая пленка приводит к приповерхностному турбулентному закручиванию течения и оказывает существенное влияние на формирование и развитие ветровых волн на начальной стадии. Для изучения влияния плёнки на волны, в нашей работе для фиксации рельефа поверхности была предложена новая модификация цветного шпирен-метода [3], а для определения полей скорости внутри жидкости использовался метод цифровой трассерной визуализации [4]. С помощью этих методов изучалась генерация ветровых волн при различных скоростях обдува в двух разных каналах, отличающихся размером и геометрией. Измерения проводились в воде с разной степенью очистки, в этаноле, а также в воде с добавлением малых концентраций (до 0,4 ммоль/л) растворимой примеси SDS (додецилсульфата натрия). Выбор жидкостей определялся разной прочностью поверхностной пленки и возможности сравнительного анализа влияния пленки на генерацию ветровых волн. В этаноле пленка не образуется совсем, в технической и дистиллированной воде плёнка присутствует, но при больших скоростях ветра она рвётся и поверхность воды очищается. SDS, несмотря на концентрацию, которая составляет до 0,05 ККМ, образует плёнку более прочную, чем в воде с естественными примесями и при больших скоростях, даже в случае разрыва может восстанавливаться путём адсорбции молекул из объёма и с поверхности. Наличие плёнки и её разрыв контролировались ИК-тепловизором. Результаты экспериментов показали, что слабая пленка разной прочности существенно влияет на генерацию и распространение ветровых волн.

Работа было выполнена с использованием оборудования, приобретённого за счёт средств Программы развития Московского университета.

**Литература:**

1. Troitskaya, Y., Sergeev, D., Vdovin, M. et. al. // J. Geophys. I Res.: Oceans. -2020. -vol. 125, e2020JC016276-19 p.
2. Мельникова О.Н., Плаксына Ю.Ю., Уваров А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ.-2022.- том 86, № 7- с. 1026-1030.
3. Zhang X., Cox Ch. // Exp. Fluids. -1994.- vol. 7.- p. 225-237.
4. Плаксына Ю.Ю., Руденко Ю.К., Пуштаев А.В. и др. // Процессы в геосредах. -2017.- т. 12, № 3 - с. 618-625.

## **Режимные характеристики изменчивости полыней Карского моря**

Рубчєня А.В.<sup>1</sup>, Май Р.И.<sup>2,3</sup>, Тимофеева А.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова (СПО ФГБУ «ГОИН»), Санкт-Петербург, Россия

[pp6077@mail.ru](mailto:pp6077@mail.ru)

**Ключевые слова:** *полыни, морской лед, Карское море, анализ полигонов*

Полыни являются уникальным природным феноменом, где происходят процессы различных пространственных и временных масштабов [1, 2]. В шельфовой зоне Арктических морей полыни формируются под действием динамических процессов вдоль кромки припая. Из-за высоких градиентов температуры между атмосферой, имеющей в зимнее время низкие температуры, и океаном, температура поверхности которого в полынье близка к температуре замерзания, возникают потоки тепла и массы. В результате чего образуются значительные объемы новых льдов и плотных вод. Наибольшими площадями и повторяемостью обладают полыни Карского моря и моря Лаптевых. Современная ледовая информация представляет собой векторные полигональные объекты, описывающие границы ледовых зон – т.е. области, где лёд имеет примерно одинаковые характеристики. В работе использовался архив электронных ледовых карт за 1998–2020 гг. [3]. Отдельный полигон полыни создавался в результате объединения следующих ледовых зон: чистая вода, начальные виды льдов, серые льды [1]. Для каждого полигона полыни рассчитаны потоки тепла, объемы льда и рассола, формирующиеся в полынях. Для анализа полигональных данных, как правило, используются промежуточные аппроксимации в виде сеточной области или системы разрезов. Однако, на наш взгляд, прямой анализ полигональных данных более предпочтителен. Ранее нами был создан и протестирован эффективный алгоритм расчета вероятности (частоты повторяемости) неограниченного количества полигонов, предложен критерий подбора одной из реальных границ полигона в качестве аналога изолинии вероятности пересечений полигонов. Были получены карты вероятности появления полыней по декадам за весь рассматриваемый отрезок времени 1998–2020 гг. Выявлены сезонная изменчивость и межгодовая тенденция изменения площади полыней, положения их границ. По выявленным режимным характеристикам появления полыней рассчитаны статистические характеристики потоков тепла через полыни, объемы льда и плотных вод, формирующиеся в полынях.

### **Литература:**

1. Карелин И.Д., Карклин В.П. Припай и заприпайные полыни арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб, Изд. ААНИИ, 2012
2. Попов А.В., Карелин И.Д., Рубчєня А.В. Роль зимних заприпайных полыней в формировании ледовых и гидрометеорологических условий в морях Сибирского шельфа в летний период. // «Метеорология и гидрология», N9 2007.
3. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets> (дата обращения: 01.09.2022).

## Нелинейные группы волн на морской поверхности со льдом

Слюняев А.В.<sup>1,2</sup>, Степанянц Ю.А.<sup>3,4</sup>, Кокорина А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>3</sup>University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia

<sup>4</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

[slunyaev@ipfran.ru](mailto:slunyaev@ipfran.ru)

**Ключевые слова:** изгибно-гравитационные волны, нелинейные волны, экстремальные морские волны, инструментальные измерения

Получено уравнение для слабонелинейных модуляций волн на поверхности воды, покрытой сжатым ледяным щитом заданной толщины в бассейне постоянной глубины. Записаны в явной форме и проанализированы коэффициенты нелинейности и дисперсии; они не содержат несоответствий, присутствующих в классической работе Liu & Mollo-Christensen (1988). Исследованы условия, когда квазисинусоидальная волна становится неустойчивой по отношению к амплитудной модуляции. Области неустойчивости построены на плоскостях физических параметров. Показано, что при определенных условиях модуляционной неустойчивости могут быть подвержены более короткие группы волн, неустойчивость развивается за меньшее число периодов волн, чем в ситуации гравитационных волн на свободной поверхности глубокой воды. Модуляционная неустойчивость может возникнуть в условиях более мелкой воды, чем при свободной поверхности.

Обсуждается реализуемость развития модуляционной неустойчивости в природных условиях. Данные инструментальных измерений волн у берега о-ва Сахалин в холодный период содержат регистрации аномально интенсивных групп волн на фоне очень слабого волнения. Эти группы могут быть проявлением специфических процессов нелинейной и диссипативной динамики волн, распространяющихся в условиях наличия на поверхности воды льда.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ 22-17-00153.

## **Динамика и термодинамика течений в атмосфере и гидросфере**

**Чашечкин Ю.Д.**

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

[yulidch@gmail.com](mailto:yulidch@gmail.com)

**Ключевые слова:** *динамика жидкостей и газов, термодинамика, полная энтропия, течения, волны, лигаменты*

Тонкая структура течений активно изучается в атмосфере и океане, моделируются лабораторными и численными методами. Основа анализа – Инженерная математика – аксиоматическая наука о принципах определения символов, правил операций и критериев контроля точности [1, 2]. Приведены основные аксиомы и определение «Движения, как преобразования пространства задачи в себя с сохранением расстояний и порядка размещения объектов». Особое внимание уделяется выбору критериев контроля точности, поскольку ряд современных математических методов не позволяют проводить вычисления и одновременно определять полноту и точность получаемых результатов. С учетом математических ограничений дополнительным методом контроля полноты и точности становится условие избыточности, позволяющее проводить сравнение результатов реализации независимых методик вычислений и экспериментов.

Основой описания процессов служит система фундаментальных уравнений механики жидкостей, которая определяет ключевые физические величины, характеризующие среду (потенциал Гиббса и плотность), течения и протекающие процессы [1]. Система уравнений состояния и переноса вещества, импульса и энергии анализируется с учетом условия совместности, определяющего ее ранг и степень характеристического уравнения. Определено минимальное число собственных функций, составляющих полное решение, удовлетворяющее начальным и граничным условиям. Малые диссипативные коэффициенты позволяют находить решения системы методами теории сингулярных возмущений. Проведены расчеты распространения капиллярно-гравитационных поверхностных и внутренних волн и сопутствующих лигаментов.

Разработанная методика оптических и контактных исследований течений позволяет регистрировать основные крупномасштабные компоненты – следы, волны, вихри и выделять тонкие слои и волокна. Результаты теневой визуализации и электролитической преципитации хорошо согласуются с данными расчетов внутренних волн и тонкой структуры течения за сферой [3].

### **Литература:**

1. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. 10(4) 286.
2. Chashechkin, Yuli D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics // Mathematics. 2021. V. 9(6). No. 586.
3. Chashechkin Y.D. Discrete and continuous symmetries of stratified flows past a sphere // Symmetry 2022, 14(6), 1278.

## Перенос веществ контактирующих сред в течениях импакта капли

Чашечкин Ю.Д.

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

[yulidch@gmail.com](mailto:yulidch@gmail.com)

**Ключевые слова:** капля, импакт, вещество, лигаменты

Встречный перенос веществ между атмосферой и гидросферой в течениях импакта капли влияет на динамике среды в широком диапазоне масштабов. В атмосферу вещество гидросферы попадает с брызгами и вторичными каплями [1]. Газ поступает в жидкость на значительную глубину в ходе образования импактных полостей [2].

В качестве научной основы методики эксперимента выбрана система фундаментальных уравнений переноса вещества, импульса и энергии с замыкающими уравнениями состояния для потенциала Гиббса и плотности неоднородной среды. Учитывается четыре механизма переноса энергии – с течениями, волнами, диффузионно-диссипативный и прямой атомно-молекулярный при перестройке тонкой надмолекулярной картины распределения внутренней энергии, уничтожении или образовании свободной поверхности. Методика эксперимента позволяет регистрировать общую картину течения и изучать ее тонкие компоненты, включая брызги, капиллярные волны, тонкие струйки – лигаменты, газовые полости и звуковые пакеты различной частоты и длительности [3].

Выделены интрузивный режим слияния, в котором в принимающую жидкость вначале втекает вещество капли, а каверна образуется с задержкой, и ударный, когда каверна начинает формироваться при соприкосновении сред. В ударном режиме вещество капли образует системы волокон и сетки на поверхности жидкости. Под узлами сетки возникают вихорьки, развивающиеся в петли при коллапсе каверны, в том числе, и при химических реакциях в области контакта сред [4]. Геометрия волокон существенно зависит от динамического состояния принимающей жидкости. В покоящейся жидкости капля формирует волокнистый вихрь, образующий каскад вторичных колец. Во вращающейся жидкости волокна образуют спиральные структуры на поверхности и винтовые линии в толще. В поле капиллярных волн пятно импакта распадается на погружающийся кольцевой вихрь и приповерхностный вихревой диполь [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598).

### **Литература:**

1. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // Докл. РАН. 2020. 494, 42–46.
2. Чашечкин Ю.Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2021. 1(94), 73–92.
3. Чашечкин Ю.Д. Перенос вещества окрашенной капли в слое жидкости с бегущими плоскими гравитационно-капиллярными волнами // Изв. РАН. Физ. атмосф. океана. 2022. 58(2), 218–229.

## **Response of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation to Arctic ice reduction - a numerical study with INM-CM48 climate system model**

Krupchatnikov V.<sup>1,2</sup>, Platov G.<sup>1,2</sup>, Gradov V.<sup>2</sup>, Borovko I.<sup>1</sup>, Volodin E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University*

<sup>3</sup>*Marchuk Institute of numerical mathematics RAS*

[vkupchatnikov@yandex.ru](mailto:vkupchatnikov@yandex.ru)

**Keywords:** *Climate change, Arctic ice, sea-ice albedo feedback, Rossby wave activity, eddy fluxes*

The amplified Arctic warming is one of several factors influencing the atmospheric dynamics. In this work, a series of numerical experiments aimed at identifying the direct role of the sea ice reduction process in forming climatic trends in the northern hemisphere is considered. In this case, we used two more or less independent mechanisms of ice reduction. The first is traditionally associated with an increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere from the historic level of 360 ppm to the level corresponding to the maximum concentration in implementing the mildest scenario RCP 2.6 - 450 ppm. The second mechanism is associated with a decrease in the albedo of ocean ice and snow. The amount of solar radiation absorbed by the ice increases, and the ice volume decreases. We assume that a comparison of the results of these two experiments allows us to judge the direct role of ice reduction, regardless of the reasons that caused this reduction. We also consider how regimes such as blocking and stationary Rossby wave activity patterns may be altered under climate change [1]. The study used the INM-CM48 climate system model [2], developed at the INM RAS and taking into account many factors of climate change. Recently, we have proposed local wave activity (LWA) as a diagnostic of local wave anomalies and blocking events. LWA is a generalization of the finite-amplitude wave activity theory into its local counterpart, quantifying waviness as a function of latitude and longitude, and is capable of measuring regional disturbances in the atmospheric circulation. In this work we quantifies LWA using Z500, which has been used to diagnose weather extremes in the troposphere such as blocking events. Here we also call attention to significant region of eddy fluxes of potential vorticity, momentum and heat near jet in Northern hemisphere.

### **Literature:**

1. Platov, G.; Krupchatnikov, V.; Gradov, V.; Borovko, I.; Volodin, E. Modelled atmospheric circulation of NH response to Arctic Sea ice reduction. *Geosciences* 2021, 11, 0.
2. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostyrykin S.V., Galin V.Ya, Lykossov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G., Shestakova A.A., Emelina S.V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 33(6), 367–374 (2018).

## **Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменения в 21 веке по расчетам с региональной климатической моделью**

Акперов М.Г.<sup>1\*</sup>, Елисеев А.В.<sup>1,2,3</sup>, Мохов И.И.<sup>1,2</sup>, Семенов В.А.<sup>1,4</sup>, Парфенова М.Р.<sup>1</sup>, Кёниг Т.<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

<sup>4</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Шведский институт гидрологии и метеорологии, Норрчёпинг, Швеция

<sup>6</sup>Центр климатических исследований им. Болина, Стокгольм, Швеция

[aseid@ifaran.ru](mailto:aseid@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** ветроэнергетические ресурсы, приземный ветер, морской лед, Арктика, изменение климата, моделирование климата, реанализ

Получены количественные оценки изменений ветроэнергетических ресурсов в Арктике с использованием региональной климатической модели (РКМ) RCA4 при сценариях изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 для 2006-2099 гг. При анализе оценивалась мощность ветроэнергетического потенциала (МВП), пропорциональная кубу скорости ветра. Для оценки МВП использовалась процедура коррекции систематической ошибки скорости приземного ветра с данными ERA5 в качестве эталонных и последующей экстраполяции скорости ветра на высоту турбины.

По расчетам с РКМ RCA4, для 21 века при обоих использовавшихся сценариях антропогенных воздействий отмечено, в частности, заметное увеличение МВП над Баренцевым, Карским и Чукотским морями зимой. Летом проявляется общее увеличение МВП над Северным Ледовитым океаном. При этом изменения более значимо проявляются при сценарии RCP8.5 с сильными антропогенными воздействиями для 21 века. Согласно полученным модельным оценкам увеличение межсуточных вариаций МВП в целом не приводит к отклонениям скорости ветра до значений, при которых работа ветрогенераторов невозможна.

## **Предсказуемость повышения максимальной среднемесячной температуры воздуха в центральной части Русской равнины для сценария SSP 3-7.0**

Александров Г.А.

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

[g.alexandrov@ifaran.ru](mailto:g.alexandrov@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *изменение климата, климатические модели, перспективные оценки повышения температуры воздуха*

Известно, что одним из ожидаемых последствий глобального изменения климата, связанного с увеличением концентрации углекислого в атмосфере является повышение приповерхностной температуры воздуха и, в частности, повышение максимальной среднемесячной температуры (МСТ). Однако, в настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о том насколько сильным оно может быть в центральной части Русской равнины при заданном сценарии выбросов углекислого газа: численные эксперименты, поставленные на разных климатических моделях, дают разные результаты и не все модели хорошо воспроизводят наблюдаемую тенденцию. Рассматривая аномалии МСТ, генерируемые климатической моделью, в качестве предикторов наблюдаемых аномалий МСТ, можно указать интервал, в который аномалии МСТ с высокой вероятностью будут попадать в будущем [1]. Применение этого метода показало, что при использовании аномалий МСТ, генерируемых INM-CM5 для сценария SSP 3-7.0, можно сделать вывод о том, что МСТ в центральной части Русской равнины с высокой вероятностью может повыситься концу этого века более чем на 1 градус, но не более чем на 2.2 градуса, а при использовании аномалий МСТ, генерируемых MRI-ESM2-0, более чем на 1.5 градуса, но не более чем на 3.5 градуса, а аномалии МСТ, генерируемые CanESM5 и MIROC6, не позволяют сделать вывод о высокой вероятности повышения МСТ. Таким образом, предсказуемость повышения максимальной среднемесячной температуры воздуха центральной части Русской равнины существенно зависит от выбора климатической модели.

### ***Литература:***

1. Alexandrov, G.A., Ginzburg, V.A., Insarov, G.E. and Romanovskaya, A.A. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5-8.5 scenario // Climatic Change. 2021. 169(3), С. 1-11.

## **Количественные показатели необходимости превентивной адаптации к изменению климата**

Александров Г.А., Гинзбург А.С., Чернокульский А.В.  
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[g.alexandrov@ifaran.ru](mailto:g.alexandrov@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** изменение климата, воздействие изменения климата, адаптация к изменению климата

Глобальное изменение климата и его региональные проявления и воздействия диктует необходимость принятия мер по адаптации к изменениям климата, призванных повысить устойчивость отраслей экономики и отдельных регионов к происходящим климатическим изменениям, снизить подверженность этим изменениям и чувствительность к ним [1].

Выделяют два основных типа адаптации: реактивная (автономная) адаптация – реакция того или иного субъекта на произошедшее или происходящее климатическое воздействие, и превентивная (плановая) адаптация, характеризующаяся систематическим плановым подходом. Превентивная адаптация относится не к субъекту адаптации (тому, кто адаптируется сам), а к объекту адаптации (который необходимо адаптировать). Превентивная адаптация основывается как на данных наблюдений, так и прогнозов о климатическом воздействии и является по существу упреждающей адаптацией [2].

В докладе описывается предложенный авторами подход [3] к определению количественных показателей климатического воздействия, превышение которых указывает на возникновение потребности в превентивной адаптации, а также некоторые используемые в мировой литературе показатели эффективности адаптационных мероприятий.

### ***Литература:***

1. Липка О.Н., Романовская А.А., Семенов С.М. Прикладные аспекты адаптации к изменениям климата в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. № 1. С. 65-90.
2. Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В. Статистическая модель для оценки формирования климатических угроз по данным мониторинга климата. Метеорология и гидрология, 2020, № 5, с. 59-65.
3. Гинзбург А.С., Александров Г.А., Чернокульский А.В. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т 58. № 6 (в печати).

## **Оценка изменений удельного потребления тепла для отопления зданий по разным климатическим моделям**

Александров Г.Г.

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

[gleb@ifaran.ru](mailto:gleb@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** модели климатической системы, изменение региональных климатических условий, глобальное потепление, энергопотребление

Значительная часть энергопотребления в Москве и других городах Русской равнины связаны с отоплением. 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 [1]. Минимальный уровень энергопотребления на отопление жилого сектора городов, как было показано в предыдущих работах [1-3], зависит от региональных климатических условий и согласно оценкам изменения температуры воздуха, сделанным Володиным и Грицуном для сценария SSP5-8.5, снижается со скоростью 1,03 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 39% к 2100 году).

В данной работе метод расчёта климатически обусловленного минимума энергопотребления [2] применяется к перспективным оценкам изменения среднемесячной температуры воздуха в центральной части Русской равнины, сделанным по различным климатическим моделям.

Показано, что согласно оценкам, CanESM5, УПТ снижается со скоростью 1,24 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 59% к 2100 году), по оценкам, сделанным GFDL-ESM4 — со скоростью 1,04 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 40% к 2100 году), по оценкам, INM-CM5 — со скоростью 1,05 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 39% к 2100 году), по оценкам, MIROC6 — со скоростью 0,94 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 40% к 2100 году), по оценкам, IPSL-CM6A-LR — со скоростью 1,48 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 56% к 2100 году), по оценкам, MPI-ESM1-2-LR — со скоростью 0,87 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 36% к 2100 году), по оценкам, MRI-ESM2 — со скоростью 0,53 кВтч/кв.м в год (т.е. примерно на 36% к 2100 году).

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-05-00254).

### **Литература:**

1. Alexandrov G.G., Ginzburg A.S. Anthropogenic impact of Moscow district heating system on urban environment //Energy Procedia.–2018.– Т.149 –С.161-169.
2. Александров Г.Г., Гинзбург А.С. //ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: ПРИЧИНЫ, РИСКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ, ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ КЛИМАТ-2019. – 2019. – Т. 26. – С. 160.
3. Александров Г.Г. // ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА.–2020.–Т.56.–Н.6 – С.700-705.

## Влияние динамических процессов в стратосфере на термический режим тропосферы

Алексеева Е.Г., Анискина О.Г.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия  
[E.Alekseeva-rshu@yandex.ru](mailto:E.Alekseeva-rshu@yandex.ru)

**Ключевые слова:** тропосфера, стратосфера, аномальное потепление, квазидвухлетнее колебание

Ранее считалось, что взаимодействие тропосферы и стратосферы незначительно, но несколько десятилетий назад была обнаружена взаимосвязь процессов происходящих в тропосфере и стратосфере, физика которой ещё непонятна. В данной работе рассматривается влияние динамических процессов стратосферы (квазидвухлетнее колебание (КДК), циркуполярный вихрь) на погодные условия тропосферы (зимние потепления на Европейской территории России (ЕТР)).

Для анализа использовались данные о максимальной суточной температуре воздуха в зимние месяцы (декабрь-март) на 48 станциях ЕТР из базы European Climate Assessment & Dataset project (<https://www.ecad.eu/>), данные о фазах КДК [1] и геопотенциальная высота на уровне 10 гПа по реанализу ERA-interim (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>).

Для анализа потеплений в тропосфере использовались нормированные аномалии максимальной температуры воздуха, что позволило сравнивать степень потепления в различных климатических регионах [2]. Рассматривались периоды (продолжительностью более пяти дней) потепления при различных фазах КДК и анализировались день начала потепления, его продолжительность и интенсивность.

Выявлено, что периоды аномального потепления чаще наблюдаются в феврале – самые сильные аномалии, как по продолжительности, так и амплитуде. При этом наиболее продолжительные зимние потепления наблюдаются после 1990 года.

Результаты совместного анализа аномалий температуры воздуха в тропосфере и полей аномалий геопотенциальной высоты в стратосфере при различных фазах КДК позволяют сделать вывод о влиянии динамики стратосферы на температурный режим тропосферы.

В стратосфере наблюдается перестройка барических полей, а после, с задержкой в 7-10 дней, в тропосфере наблюдается потепление. Данная связь лучше всего прослеживается у потеплений зимних месяцев и начала марта.

### **Литература:**

1. Погорельцев А.И. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции атмосферы / Погорельцев А.И. Савенкова Е.Н. Ученые записки РГГМУ. 2009.- №11 – С. 53-62
2. Алексеева Е. Г. Колебания циркуляции стратосферы и их связь с температурой воздуха в нижней тропосфере / Алексеева Е. Г., Анискина О. Г. – РГГМУ. – 8 с.

## **Учет неопределенностей в ансамблевой системе прогноза погоды на основе модели ПЛАВ**

Алипова К.А.<sup>1,2</sup>, Гойман Г.С.<sup>2,3,1</sup>, Мизяк В.Г.<sup>1</sup>, Рогутов В.С.<sup>1</sup>, Толстых М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

Долгопрудный, Россия

[ksusha\\_ast@mail.ru](mailto:ksusha_ast@mail.ru)

**Ключевые слова:** долгосрочный прогноз погоды, сезонный прогноз погоды, ансамблевый прогноз, неопределенность, модель атмосферы

В настоящее время ансамблевый метод является одним из наиболее перспективных в численном прогнозе погоды. Причина этого состоит в возможности учета неопределенностей, возникающих как в оценке начального состояния атмосферы, так и в численной модели атмосферы.

В работе рассматривается ансамблевая система прогноза погоды, развиваемая в Гидрометцентре России и в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН. Данная система состоит из глобальной модели атмосферы ПЛАВ (горизонтальное разрешение  $0,9^\circ \times 0,72^\circ$  и 96 вертикальных уровней) [1] и ансамблевой системы усвоения на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (LETKF) [2].

Учет неопределенностей в начальном состоянии атмосферы производится путем введения аддитивной инфляции в ансамблевой системе усвоения данных. Для учета неопределенностей в блоке физических параметризаций в модели атмосферы ПЛАВ реализовано стохастическое возмущение параметров и тенденций параметризаций [3]. Новая ансамблевая система успешно прошла оперативные испытания в Гидрометцентре России с августа 2021 по январь 2022 года и в настоящее время работает в оперативном режиме для среднесрочных ансамблевых прогнозов.

Данная работа посвящена исследованию предсказуемости индекса североатлантического колебания для ретроспективных сезонных прогнозов для зимних сезонов 1991-2015 годов.

Исследование выполнено в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>

### **Литература:**

1. Толстых М.А. [и др.] Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. 2017
2. A. Shlyayeva et al, Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model, Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 28, 4 (2013), 419–441
3. K. Alipova et al, Stochastic perturbation of tendencies and parameters of parameterizations in the global ensemble prediction system based on the SL-AV model, Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 37, 6 (2022)

## Отклик температуры воздуха в нижней тропосфере и стратосфере в зимний период на изменение повторяемости блокирований над Уралом - Сибирью

Антохина О.Ю.<sup>1,2</sup>, Антохин П.Н.<sup>1</sup>, Зоркальцева О.С.<sup>2</sup>, Мартынова Ю.В.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>4</sup>Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, Россия

[olgayumarchenko@gmail.com](mailto:olgayumarchenko@gmail.com)

**Ключевые слова:** приземная температура воздуха, внезапные стратосферные потепления, атмосферное блокирование, холодные зимы

Резкое потепление Арктики (ПА) с конца 1990-х гг. привело к изменению характеристик зимнего блокирования над Уралом и Сибирью (У-С) и связанному с ним усилению климатического режима, получившего название «Теплая Арктика - холодная Евразия» (ТАХЕ). Помимо влияния на приземную температуру воздуха и характеристики Сибирского антициклона, блокирование над У-С рассматривается в качестве основного предиктора возникновения внезапных стратосферных потеплений (ВСП). В работе оценивается линейный отклик температуры воздуха в зимние месяцы на изменение повторяемости блокирований в периоды 1979-1999 и 2000-2020 на основании данных реанализа ERA 5. В соответствии с актуализацией данной выше, мы исследовали отклик приземной температуры воздуха в тропосфере (Tsurf) и температуры воздуха в стратосфере на уровне 10 и 1 гПа. В качестве критерия блокирования мы исследуем повторяемость мгновенного блокирования (IBF) в секторе 50°-80° с.ш. на основе индекса GHGS (южный градиент геопотенциала) с двумя вариантами центральной широты ( $\lambda$ ) 50° и 60° с.ш. на сетке 2.5°×2.5° как это было представлено в [1]. С использованием  $\lambda = 50^\circ$  было получено, что с начала 2000-х отклик температуры на изменчивость IBF усиливается для второй половины зимы (январь-март) и ослабевает для первой (ноябрь-декабрь). Вместе с появлением сигнала для приземной температуры по типу ТАХЕ в январе-марте, отмечено изменение отклика для стратосферы (усиление положительных корреляций) в ответ на увеличение блокингов над Уралом-Сибирью. В январе и ноябре с 2000-х гг. особенно необходимо учитывать блокинги, формирующиеся в северных широтах, так корреляция IBF при  $\lambda = 60^\circ$  и Tsurf была выше и имела большие площади, по сравнению с  $\lambda = 50^\circ$ , что может свидетельствовать о сдвиге центральной широты блокирования к северу.

Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ № 22-77-10008 «Исследования крупномасштабных явлений в нижней и средней атмосфере и оценка их локального проявления на высотах мезосферы-нижней термосферы»

### Литература:

1. Antokhina, O. Yu. Atmospheric blockings in Western Siberia. Part 1. Detection features, objective criteria, and their comparison / O. Yu. Antokhina, P. N. Antokhin, O. S. Zorkal'tseva, E. V. Devyatova // Russ. Meteor. and Hydr. - 2017. - V. 42. - P. 544-652

## **Кластеризация погодных режимов в Евро-Атлантическом секторе в зимний и летний периоды различными методами**

Бабанов Б.А.<sup>1</sup>, Семенов В.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт географии РАН, Москва, Россия*

[babanov@ifaran.ru](mailto:babanov@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *методы кластеризации, k-means, погодные режимы, циркуляция атмосферы*

Классификация синоптических состояний на типы атмосферной циркуляции или погодные режимы является одним из способов изучения динамики атмосферы. В настоящее время, как правило, используются численные методы классификации, также называемые «объективными». Среди численных классификаций чаще всего применяется кластерный анализ, который, в свою очередь, подразделяется на множество различных методов. В данном докладе будет представлено сравнение результатов кластеризации погодных режимов в Европе и Северной Атлантике в зимний и летний периоды с помощью четырех наиболее часто применяемых методов: 1) метода k-means, 2) самоорганизующихся карт Кохонена (SOM), 3) иерархической кластеризации методом сцепки Уорда и 4) модели Гауссовой смеси. Для примера исследуются погодные режимы в Евро-Атлантическом секторе в зимний и летний сезоны.

В результате кластеризации полей геопотенциала на высоте 500 гПа получено по 4 погодных режима для зимы и лета. Проведено сравнение схожести полученных режимов, их повторяемости и средней продолжительности. С целью изучения прогнозируемости погодных режимов посчитаны матрицы переходов, оценена их значимость, в результате чего получены наиболее вероятные и значимые цепочки переходов. В результате сравнения методов выявлено, что: а) метод SOM в заданных условиях даёт результаты, практически идентичные методу k-means, и оба метода показывают хорошо воспроизводимые результаты, б) иерархическая кластеризация производит слишком «населенные» кластеры, в) кластеризация гауссовой смесью производит слабовыраженные и плохо воспроизводимые кластеры.

## Изменчивость струйных течений в атмосфере Северного полушария в последние десятилетия (1980-2021 гг.)

Безотеческая Е.А.<sup>1,2</sup>, Чхетиани О.Г.<sup>2</sup>, Мохов И.И.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
[eadurneva@aari.ru](mailto:eadurneva@aari.ru)

**Ключевые слова:** климатическая изменчивость, атмосферная циркуляция, высотные струйные течения, явления Эль-Ниньо, данные наблюдений и реанализа

На основе данных реанализа получены количественные оценки среднемесячных значений кинетической энергии высотных струйных течений Северного полушария ( $E_k$  СТ СП) за период 1980-2021 гг. при разных условиях для минимальной скорости ветра  $V_m$  в области СТ – более 20 м/с ( $V_{ax} \geq 20$ ), 30 м/с ( $V_{ax} \geq 30$ ) и 40 м/с ( $V_{ax} \geq 40$ ). Сделаны соответствующие оценки доли кинетической энергии, связанной с СТ, от общей кинетической энергии атмосферы Северного полушария ( $P_{E_k}$  СТ СП). Наряду с этим оценена доля объема атмосферных слоев в области СТ в Северном полушарии в общем анализируемом слое атмосферы 500-100 гПа ( $P_v$  СТ СП).

Существенные изменения отмечены для летних сезонов. В том числе, отмечены значимые тренды ослабления  $E_k$ ,  $P_{E_k}$  и  $P_v$  в июле и августе при  $V_{ax} \geq 20$  и  $V_{ax} \geq 30$ . В зимние сезоны значимые изменения отмечены только для  $P_v$  – с уменьшением при  $V_{ax} \geq 20$  и  $V_{ax} \geq 30$ . При  $V_{ax} \geq 40$  значимых изменений  $E_k$ ,  $P_{E_k}$  и  $P_v$  не выявлено. В переходные сезоны значимых изменений не отмечено.

Проведен анализ связи  $E_k$  СТ СП с явлениями Эль-Ниньо, характеризуемыми индексами Nino 3, Nino 4 и Nino 3.4. Результаты анализа выявили положительную корреляцию  $E_k$  при разных значениях  $V_m$  с индексами Эль-Ниньо, главным образом с индексами Nino 3 и Nino 3.4 с января по апрель, с ослаблением корреляции в мае. С июня по ноябрь проявляется слабая, в основном отрицательная, корреляция, с переходом к положительной корреляции в декабре. Отмеченные тенденции и связь с индексами Эль-Ниньо наиболее значимо проявляются в области ядра субтропического струйного течения на уровне 200 гПа.

## **Количественное оценивание полярного усиления. Статистические проблемы**

**Бекряев Р.В.**

*Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия*  
[bekryaev@mail.ru](mailto:bekryaev@mail.ru)

**Ключевые слова:** полярное усиление, статистическое оценивание, метод Филлера

Полярное усиление (ПУ) изменений климата проявляется в зональной неоднородности отклика климатической системы на внешние воздействия. В частности, приземная температура воздуха в высоких широтах в условиях глобального антропогенного потепления растет сильнее, чем в умеренной и тропической зоне.

Наиболее распространенной метрикой ПУ является отношение оценок коэффициентов линейных трендов приземной температуры воздуха для северной полярной области и для северного полушария. На основе простой статистической модели показано, что функция распределения коэффициента ПУ в этом случае обладает тяжелыми хвостами, соответственно, выборочные оценки коэффициента ПУ неустойчивы и характеризуются большой изменчивостью.

Метод Филлера предоставляет возможность объективного оценивания ПУ при ансамблевом воспроизведении изменений климата. Рассматривается применимость метода Филлера в условиях нестационарного отклика климатической системы на внешние воздействия.

## **Первые результаты прогноза по совместной модели атмосфера - океан для региона Белого моря в летний период года**

Бутаков Н.Ю.<sup>1,2</sup>, Рубинштейн К.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

[nikita.butakov.2019@mail.ru](mailto:nikita.butakov.2019@mail.ru)

**Ключевые слова:** совместная модель, взаимодействие атмосферы и моря, Белое море

Рассчитаны прогнозы по совместной модели атмосфера–море для региона Белого моря. Получены оценки качества прогноза двух ключевых для совместного моделирования параметров – температуры поверхности моря и температуры воздуха на 2 м. Произведено сравнение качества прогноза температуры воздуха на 2 м по совместной модели с прогнозом по автономной модели. По результатам анализа расчетов показано, что систематическое завышение рассчитанных значений температуры поверхности моря относительно данных анализа OISST составляет 0.4 °С. Ошибки прогноза температуры поверхности моря у берегов моря принимали сравнительно большие значения, тогда как в открытом море ошибки прогноза были значительно меньше. Показано также, что прогноз температуры воздуха на 2 м в целом был успешней при использовании совместной модели, причём улучшение качества прогноза температуры воздуха на 2 м при использовании совместной модели наблюдалось главным образом в районах расчётной области, непосредственно прилегающих к Белому морю. Показано, что были временные интервалы, в которые морская модель сильно влияла на прогноз температуры воздуха на 2 м, и интервалы, в которых влияние морской модели было минимальным.

## **Изменение циркуляции стратосферы Арктики в XXI веке по расчетам климатической модели ИВМ РАН**

Варгин П.Н.<sup>1,2</sup>, Кострыкин С.В.<sup>2,3</sup>, Володин Е.М.<sup>3</sup>, Погорельцев А.И.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

[p\\_vargin@mail.ru](mailto:p_vargin@mail.ru)

**Ключевые слова:** моделирование климата, динамика стратосферы, планетарные волны, весенняя перестройка циркуляции стратосферы

Результаты расчетов 5-й версии климатической модели ИВМ РАН для условий будущего климата с 2015 г. по 2100 г., проведенных в рамках проекта CMIP6 по сценариям умеренного (SSP2-4.5) и жесткого роста концентраций парниковых газов (SSP5-8.5), используются для исследования изменений стратосферного полярного вихря в Арктике, распространения планетарных волн и меридиональной циркуляции.

К концу XXI века в зимней стратосфере будет наблюдаться снижение среднезональной температуры примерно от  $-1^{\circ}$  в нижней до  $-4^{\circ}$  в верхней стратосфере при умеренном сценарии и соответственно от  $-1^{\circ}$  до  $-11^{\circ}$  при жестком сценарии.

К концу XXI века по сравнению с его началом возможно усиление распространения волновой активности и усиление стационарной планетарной волны с зональным числом 1 в средней и верхней стратосфере (особенно при жестком сценарии).

По обоим сценариям не выявлено изменения частоты главных внезапных стратосферных потеплений в Арктике в течение XXI века.

В верхней стратосфере Северного полушария в зимний период к концу XXI века выявлено усиление остаточной циркуляции, характеризующей меридиональную циркуляцию Бревера-Добсона. При жестком сценарии это усиление сильнее, чем при умеренном.

Выявлено увеличение осредненных за зимний сезон значений «объемов» полярных стратосферных облаков (ПСО) к концу века (особенно для жесткого сценария) и усиление их межгодовой изменчивости. В отдельные годы к концу XXI века «объем» ПСО может быть почти в 2 раза больше, чем наблюдавшийся в 2011 г. и 2020 г., когда разрушение озонового слоя в стратосфере Арктики было максимальным. К концу века увеличивается период, когда образуются ПСО: при жестком сценарии они образуются в течение всей зимы. Такое выявленное усиление стратосферного полярного вихря в отдельные годы во второй половине XXI века может привести к очень сильному разрушению озонового слоя.

## **Анализ макроциркуляции и предсказуемости аномальных атмосферных процессов регионального масштаба в 2021-2022 гг.**

Вильфанд Р.М.<sup>1</sup>, Хан В.М.<sup>1</sup>, Куликова И.А.<sup>1</sup>, Володин В.М.<sup>2,1</sup>, Воробьева В.В.<sup>2,1</sup>, Макарова М.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

[romanviltand@mail.ru](mailto:romanviltand@mail.ru)

**Ключевые слова:** атмосфера, циркуляция, аномальные процессы, блокирование, изменчивость, индексы дальних связей, предсказуемость, долгосрочные прогнозы, глобальные модели

Рассматриваются вопросы, связанные с особенностями и предсказуемостью аномальных атмосферных процессов регионального масштаба на недельных и месячных интервалах, на базе глобальной модели (ПЛАВ), разработанной в ИВМ РАН совместно с Гидрометцентром России.

Для количественной оценки внутрисезонной изменчивости используются индексы «дальних связей», позволяющие идентифицировать режимы зонального потока и режимы блокирования. Показано, что оперативные прогнозы индексов на недельном интервале интегрирования объясняют 70-80% суммарной дисперсии региональной атмосферной изменчивости. За его пределами качество прогнозов резко падает. На месячном интервале полезный сигнал может быть получен с использованием вероятностных форм представления прогнозов. Наибольшие погрешности отмечаются в прогнозах отрицательной фазы Западно-Атлантического WA (Западно-Тихоокеанского WP) колебаний. Наилучшие оценки качества прогнозов ассоциируются с режимами типа блокирования на территории Северной Евразии.

Особое внимание уделяется аномальным процессам летних периодов 2021 и 2022гг. Особенностью 2021г. стало преобладание блокирующих процессов, что, стало причиной наводнений в Германии, Австрии и Швейцарии. Результаты экспериментов по модели ИВМ РАН показали, что основным определяющим фактором в формировании режима осадков стала внутренняя изменчивость атмосферы, а не внешние факторы (термическое состояние океана, влажность почвы). Продемонстрированы возможности воспроизведения месячных аномалий осадков.

Летний период 2022г. отметился неустойчивостью региональных режимов атмосферной циркуляции, что нашло отражение в смене знаков индексов. При этом в прогнозах на базе модели ПЛАВ происходила потеря предсказуемости. Полученные результаты могут использоваться в практике долгосрочных метеорологических прогнозов.

Работа выполнена при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ"

## **Развитие модели климатической системы ИВМ РАН**

Володин Е.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[volodinev@gmail.com](mailto:volodinev@gmail.com)

**Ключевые слова:** модель, климат, параметризация, температура, осадки, систематическая ошибка

Рассматривается развитие модели климатической системы ИВМ РАН. По сравнению с версией 2018г, использовавшейся в CMIP6, были усовершенствованы параметризации облачности, эволюции снежного покрова, эволюции аэрозолей, расчета электрических явлений. В результате заметно улучшилось качество воспроизведения современного климата. В частности, уменьшились нормы систематических ошибок для температуры, осадков, скорости ветра, радиационно-облачного форсинга и других метеополей, по которым принято оценивать качество модели в научном сообществе. Рассматривается также моделирование изменений климата, наблюдавшихся в последнее столетие. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития модели.

## Анализ предсказуемости ведущих мод климатической изменчивости на временных масштабах до 5 лет на основе климатической модели INMCM5

Воробьева В.В.<sup>1,2,3</sup>, Володин Е. М.<sup>1,2</sup>, Грицун А.С.<sup>1</sup>, Тарасевич М.А.<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

[VVorobyeva@yandex.ru](mailto:VVorobyeva@yandex.ru)

**Ключевые слова:** климатическая модель, предсказуемость, сверхдолгосрочный прогноз, декадный прогноз, крупномасштабные моды, климатическая изменчивость, Северо-Атлантическое колебание, квазидвухлетнее колебание, Эль-Ниньо-Южное колебание, морской лед, теплосодержание

На основе климатической модели Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН INMCM5 [1] разработана система создания ансамблевых декадных прогнозов, в которой начальное состояние климатической системы задается с использованием метода инициализации аномалиями относительно модельного климата [2] и соответствует наблюдаемому состоянию на определенную дату. Проведена серия ретроспективных прогнозов на 5 лет. Расчеты начинались 1 ноября 1980-2020 гг.

Показано наличие весеннего барьера предсказуемости для суммарной площади морских льдов в Арктике и явления Эль-Ниньо-Южного колебания (ЭНЮК) для 1-го года экспериментов. Для 2-го и последующих лет расчетов сохраняется высокое качество прогноза суммарной площади арктических морских льдов, а качество прогноза ЭНЮК существенно снижается. Показана возможность прогноза квазидвухлетнего колебания на срок до 5 лет. Качество прогноза зимнего индекса Северо-Атлантического колебания (САК) для 2-ого года прогнозов низко, но прогнозирование САК на многолетних временных масштабах является актуальной проблемой для современных прогностических систем.

На предсказуемость площади морского льда в Арктике следующим летом в большей степени влияет внешний форсинг, тогда как на весеннюю предсказуемость - как информация о начальном состоянии, так и вариация внешних воздействий. Увеличение предсказуемости теплосодержания верхнего 300-метрового слоя океана за счет задания реального начального состояния происходит в основном в Тихом океане (за счет отображения в серии декадных прогнозов правильной фазы Тихоокеанского декадного колебания). В Северной Атлантике, где системы декадного прогнозирования традиционно демонстрируют высокое качество прогноза, модель INMCM5 уже показывает хорошую предсказуемость в исторических экспериментах, и задание реального начального состояния не приводит к значимому увеличению качества прогноза.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке РНФ (грант № 22-17-00247).

### Литература:

1. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 / E. M. Volodin, E. V. Mortikov, S. V. Kostyrykin [et al.] // Climate Dynamics. – 2017. – Vol. 49. – P. 3715–3734.
2. Vorobyeva, V. V. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale / V. V. Vorobyeva, E. M. Volodin // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. — 2021. — Vol. 73, № 1. — P. 1–12.

## **Воспроизведение аномалий осадков в сезонных ретроспективных прогнозах климатической модели INMCM5 на лето 2021 года**

**Воробьева В.В.<sup>1,2,3</sup>, Володин Е.М.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия*

[VVorobyeva@yandex.ru](mailto:VVorobyeva@yandex.ru)

**Ключевые слова:** климатическая модель, предсказуемость, сезонный прогноз, экстремальный, осадки, Европейская территория России, Черное море

В течение летнего сезона 2021г. на Европейской территории России(ЕТР) наблюдался существенный дефицит осадков в средней полосе (50 °с.ш.-60 °с.ш.), в то время как на юге ЕТР, особенно на побережье Черного моря, наблюдались большие положительные аномалии осадков. С климатической моделью ИВМ РАН INMCM5 [1] с целью оценки качества воспроизведения аномалий осадков лета 2021г. и исследования причин их возникновения были произведены несколько серий ансамблевых численных экспериментов, отличающихся задаваемыми начальными состояниями.

Модель воспроизводит основные особенности режима осадков летом 2021г., но величина аномалий осадков в 2-3 раза меньше по модулю, чем по данным реанализа. Учет реального начального состояния океана ведет к отрицательным аномалиям осадков не только в центральной части ЕТР, но и в черноморском регионе, что не соответствует наблюдениям. Учет реального начального состояния влажности почвы ведет к положительным аномалиям осадков в центральной части ЕТР, что также не согласуется с наблюдениями. Основной вклад в сезонные аномалии по данным модели вносят большие аномалии осадков в первой половине июня, определяющиеся в основном начальным состоянием атмосферы. В природе также в первой половине июня наблюдались большие аномалии осадков. Однако, в природе дефицит осадков в умеренных широтах ЕТР был и во второй половине июня (это воспроизводится моделью, но хуже) и в июле (дефицит осадков в модельных экспериментах в июле виден лишь севернее 60 °с.ш.). Избыток осадков на побережье Черного моря наблюдался и в июле, и в августе, но в модельных экспериментах этого нет.

Увеличение температуры воды по всей глубине Черного моря не приводит к значимому изменению характеристик экстремальных аномалий осадков в летний период 2021г.

Ансамбль экспериментов, в котором начальное состояние соответствует 1 мая 2021г., не воспроизводит экстремальные аномалии осадков лета 2021г.

Работа выполнена при поддержке мегагранта Минобрнауки РФ (соглашение № 2020-220-08-9032).

### **Литература:**

1. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 / E. M. Volodin, E. V. Mortikov, S. V. Kostyrykin [et al.] // Climate Dynamics. – 2017. – Vol. 49. – P. 3715—3734.

## Проявление законов А. Н. Колмогорова в океанах и атмосферах

Голицын Г.С.

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

[gsg@ifaran.ru](mailto:gsg@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** случайные блуждания, атмосферные вихри

Будут показаны примеры вихрей в океанах и атмосферах Земли, Марса и Юпитера. Согласно законам А. Н. Колмогорова 1934 г., выражающие законы движения Ньютона при случайном наборе ускорений, как было показано А. М. Обуховым, 1958, средние квадраты скоростей и средние квадраты размеров вихрей являются степенями времени, первые линейными, вторые – кубическими [1]. Если планеты вращаются, то период вращения является масштабом, ограничивающим рост указанных вторых моментов случайных движений. Данные для ураганов, вихрей на поверхности океана, приполярных вихрей на Юпитере, Сатурне и, вероятно, Марсе свидетельствуют в пользу выполнения этих законов Колмогорова.

### **Литература:**

1. Голицын Г.С. Законы случайных блужданий А. Н. Колмогорова 1934 года. Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 5-15.

## **Оценки естественных потоков парниковых газов в атмосферу и их вклада в изменения климата в 21 веке**

*Денисов С.Н.<sup>1</sup>, Елисеев А.В.<sup>1,2</sup>, Мохов И.И.<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[denisov@ifaran.ru](mailto:denisov@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *моделирование климата, потоки парниковых газов, потенциал изменения глобальной температуры*

Анализ потоков парниковых газов в атмосферу из природных резервуаров требует адекватного учета углеродного баланса различных экосистем, в том числе бореальных лесов и болот. Проведена серия численных расчетов с использованием модели Земной системы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (МЗС ИФА РАН) для оценки природных потоков углекислого газа и метана в различных регионах Северного полушария при сценариях антропогенного воздействия семейства SSP. Проведен также анализ соответствующих потоков парниковых газов по расчетам с ансамблем глобальных моделей международного проекта CMIP6.

Результаты анализа ансамблевых расчетов с моделями Земной системы свидетельствуют о значительных расхождениях в оценках региональных потоков парниковых газов в атмосферу на региональном масштабе.

Получены оценки влияния региональных естественных и антропогенных потоков парниковых газов на глобальную приповерхностную температуру атмосферы в 21 веке с использованием кумулятивного температурного потенциала [1-2], основанного на модифицированном потенциале изменения глобальной температуры.

Показано, что изменения климатических условий при различных сценариях антропогенных воздействий могут сильно влиять на количественные оценки климатического вклада естественных и антропогенных потоков парниковых газов в атмосферу, особенно на больших временных горизонтах. В современных климатических условиях природные потоки углекислого газа и метана в атмосферу с территории России по данным подавляющего большинства климатических моделей оказывают стабилизирующее влияние на климат. При этом для многих моделей (в т.ч. для МЗС ИФА РАН) характерно сокращение поглощения углекислого газа наземными экосистемами к концу 21 века и соответствующее снижение этой стабилизирующей способности.

### **Литература:**

1. Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И. Вклад естественных и антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в атмосферу с территории России в глобальные изменения климата в XXI веке // Доклады АН. 2019. Т. 488. № 1. С. 595–601.
2. Denisov S.N., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Model estimates for contribution of natural and anthropogenic CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions into the atmosphere from the territory of Russia, China, USA and Canada to global climate changes in the 21st century // arXiv. 2021. 2111.11793

## Сезонный прогноз начала пыления березы на европейской территории России с использованием модели INMCM5

Емелина С.В.<sup>1,2,3</sup>, Воробьева В.В.<sup>2</sup>, Тарасевич М.А.<sup>2</sup>, Володин Е.М.<sup>2</sup>, Хан В.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[tkachukzn@gmail.com](mailto:tkachukzn@gmail.com)

**Ключевые слова:** сезонный прогноз начала пыления березы, фенологическая модель

Представлены результаты сезонного прогноза даты начала пыления березы. Для определения начала пыления березы используется температурно-временная фенологическая модель, которая для созревания пыльцевых зерен учитывает температурный форсинг или сумму активных температур. Для сезонного прогноза даты начала пыления березы с подходом применения фенологической модели были использованы прогнозы модели INMCM5, разрешение  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  градуса. В качестве фактических дат начала пыления были приняты расчетные даты по реанализу ERA5 ( $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ). Расчетные данные по дате начала пыления на основе хиндкастов модели INMCM5 были оценены в режиме кроссвалидации, оценивались средние систематические ошибки и коэффициенты пространственной корреляции для центрального района, северо-западного и южного района. В ЦФО средняя систематическая ошибка составляет +0,2 дня, тогда как для СЗФО и ЮФО -0,2 дня. Коэффициенты пространственной корреляции для всех трех районов выше 0,99. Также были оценены прогнозы даты начала пыления в 2022 году на основе оперативных сезонных прогнозов приземной температуры по модели INMCM5 с месячной заблаговременностью и с нулевой заблаговременностью. В ЦФО и ЮФО систематическая ошибка ниже у прогнозов с месячной заблаговременностью (-5 и +6 дней), чем с нулевой заблаговременностью (-9 и +10 дней, соответственно), при этом в СЗФО прогноз с нулевой заблаговременностью точнее на 2 дня (-6 и -8 дней). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что сезонный прогноз приземной температуры модели INMCM5 можно использовать в качестве входной информации для температурно-временной фенологической модели для расчета прогноза даты начала пыления.

Работа по оценке оперативных прогнозов даты начала пыления по фенологической модели выполнена при финансовой поддержке МинОбрНауки РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН), работа по расчетам сезонных прогнозов температуры воздуха по модели INMCM5 выполнена в ИВМ РАН при поддержке проекта РНФ 22-17-00247.

## **Изменчивость экстремальных температур воздуха и осадков в различных природных зонах**

Железнова И.В., Гушина Д.Ю.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
[ijeleznova@gmail.com](mailto:ijeleznova@gmail.com)

**Ключевые слова:** экстремальные явления погоды, растительные сообщества, температура воздуха, атмосферные осадки, изменение климата

Глобальный рост температуры на планете сопровождается увеличением частоты возникновения экстремальных погодных событий. Экстремальные явления погоды, проявляющиеся в резких температурных колебаниях, дефиците или избытке атмосферных осадков могут привести к значительным нарушениям в течении обменных процессов в растениях и функционировании растительных сообществ. Метеорологические условия оказывают существенное влияние на рост, развитие и продуктивность лесов, регулируя процессы транспирации и  $\text{CO}_2$  обмена растительных сообществ. Причем в зависимости от типа растительности и климатических условий степень и характер такого влияния может значительно изменяться. Поэтому задачей настоящей работы было выявить районы с различными типами растительных сообществ, наиболее подверженные воздействию экстремальных температур и осадков в последние десятилетия.

Методологические подходы к выделению экстремальных явлений отличаются большим разнообразием. Для выявления регионов с экстремальными значениями температуры и осадков было использовано два подхода: 1) превышение одного среднеквадратического отклонения в глобальных месячных полях температуры и осадков в период 1979–2021 гг и 2) превышение 95% квантиля для тех же величин (для температуры воздуха было использовано нормальное распределение, для осадков – распределение Вейбулла).

Для всего Земного шара было рассчитано количество случаев превышения порога экстремальности, полученного различными методами, и проанализирована их пространственно-временная изменчивость в различные сезоны года. Кроме того, проведена оценка изменения частоты возникновения экстремальных условий в первые десятилетия XXI века по сравнению с концом XX века и выявлены регионы, в которых эти изменения проявились наиболее сильно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-17-00073.

## Долговременная изменчивость характеристик внезапных стратосферных потеплений по данным Era 5

Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю.

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

[meteorologist-ka@yandex.ru](mailto:meteorologist-ka@yandex.ru)

**Ключевые слова:** Внезапные стратосферные потепления, стратосфера, тропосфера

Данные спутникового и радиозондового мониторинга демонстрируют, что с середины двадцатого века наблюдается увеличение температуры в тропосфере, а в стратосфере напротив – средняя глобальная температура уменьшается. Эти изменения в первую очередь связаны с увеличением концентрации парниковых газов и истощением стратосферного озона [Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013]. На фоне таких изменений остается открытым вопрос об изменчивости нелинейных процессов, таких как блокинги в тропосфере и внезапные стратосферные потепления в стратосфере. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) различает два типа событий ВСП: крупные (мажорные) потепления в середине зимы, характеризующиеся обращением зональной циркуляции, и незначительные (минорные) потепления с ограниченными изменениями циркуляции [WMO/IQSY, 1964]. В последнее десятилетие предложены различные методы идентификации ВСП, основанные на морфологии полярного вихря (тип смещения, при котором вихрь смещается от полюса; тип расщепления ВСП, когда полярный вихрь разделяется на две части) [Charlton et al., 2007; Butler et al., 2015].

Данная работа посвящена оценке долговременной изменчивости параметров внезапных стратосферных потеплений (ВСП) с 1979 по 2021 г. В качестве критерия для оценки ВСП были использованы значения среднезональной температуры воздуха на широте 80° с.ш. и среднезональной скорости ветра на 60 ° с.ш. на высотах 10 гПа. Мажорные ВСП были классифицированы по типам – с разделением полярного вихря (ПВ) и со смещением ПВ. Были проведены оценки изменчивости таких параметров ВСП как количество случаев за зиму, тип ВСП, продолжительность ВСП, дата начала и максимальная температура во время ВСП за последние 42 года. Оказалось, что не наблюдается трендовых изменений, а присутствуют квазипериодические колебания перечисленных параметров в высокоширотной стратосфере.

Работа выполнена при поддержке РНФ №22-77-10008.

### **Литература:**

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge, 1535 pp.
2. WMO, 1964: Implementation of the WMO-IQSY STRATWARM PROGRAMME. WMO Bulletin, 13(4), 200-205
3. Charlton, A. J., and L. M. Polvani, 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. J. Climate, 20, 449–469, doi: 10.1175/JCLI3996.1
4. Butler, A. H., Seidel, D. J., Hardiman, S. C., Butchart, N., Birner, T., & Match, A. Defining sudden stratospheric warmings. Bulletin of American Meteorological Society, 2015, 96, 1913– 1928.

**Динамика стратосферно-тропосферного взаимодействия  
в различные фазы Эль-Ниньо Южного Колебания  
и Тихоокеанского десятилетнего колебания  
в идеализированных модельных экспериментах**

Зюляева Ю.А.<sup>1</sup>, Собаева Д.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Россия  
[yulia@sail.msk.ru](mailto:yulia@sail.msk.ru)*

**Ключевые слова:** *стратосферный полярный вихрь, ЭНЮК, ТДК, шторм-треки Северного полушария*

Экстремальные состояния стратосферного полярного вихря (СПВ) могут влиять на среднее положение основных траекторий распространения циклонов в Северном полушарии на временном периоде от 2 недель до 2 месяцев. Данный временной масштаб считается одним из самых сложных периодов в практике прогнозирования. На основе анализа данных идеализированных численных экспериментов на платформе ISCA<sup>1</sup> были изучены механизмы формирования аномалий интенсивности СПВ под влиянием крупномасштабных аномалий температуры поверхности Тихого океана (аТПО). В экспериментах аТПО, соответствующие модам Эль-Ниньо Южного колебания (ЭНЮК) и Тихоокеанского десятилетнего колебания (ТДК), были удвоены. Было показано, что во время событий Эль-Ниньо на фоне нейтральной фазы ТДК формирование аномалий интенсивности СПВ происходит в основном за счет изменчивости планетарной волны 2, которая объясняет до 38% изменчивости стратосферной динамики в данных условиях. Если Эль-Ниньо происходит на фоне положительной фазы ТДК, волна 1 играет ведущую роль в формировании аномалий интенсивности СПВ и объясняет до 26% ее изменчивости. При событиях Ла-Нинья формирование аномалий интенсивности СПВ происходит в основном за счет изменчивости волны 1. Также был проанализирован отклик тропосферной динамики на крупномасштабные аТПО Тихого океана при различной интенсивности СПВ. Было показано, что нельзя однозначно сказать о смещении Атлантического шторм-трека к югу при событиях Эль-Ниньо без учета интенсивности СПВ. Максимальным прогностическим потенциалом интенсивность СПВ, выраженная как зональная компонента скорости ветра, осредненная вдоль 60 с.ш. на уровне 10 гПа, обладает в условиях Ла-Нинья на фоне отрицательной фазы ТДК.

**Литература:**

1. Vallis G. K. et al. Isca, v1. 0: A framework for the global modelling of the atmospheres of Earth and other planets at varying levels of complexity //Geoscientific Model Development. – 2018. – Т. 11. – №. 3. – С. 843-859.

## Особенности изменений и изменчивости климата в Западном секторе Арктики на примере Баренцевоморского региона

Иванов Б.В.<sup>1,2</sup>, Карандашева Т.К.<sup>1</sup>, Демин В.И.<sup>3,1</sup>, Ревина А.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Поллярный геофизический институт, Апатиты, Россия

[b\\_ivanov@aari.ru](mailto:b_ivanov@aari.ru)

**Ключевые слова:** западная арктика, баренцево море, изменения и изменчивость климата

Анализ метеорологических наблюдений на арх. Шпицберген [1], Земле Франца Иосифа (ЗФИ) [2] и в ряде прибрежных районах Баренцева моря (БМ) позволили корректно оценить особенности долгопериодных изменений и изменчивости климата. Общая тенденция к потеплению за период 1911-2020 гг. [1] в Баренцбурге хорошо согласуется с ранее полученными результатами для Лонгйира, 1900-2014 гг. и 1898-2018 гг., а также с результатами, полученными для ЗФИ [2]. Линейные тренды, полученные для среднемесячных значений приземной температуры воздуха (ПТВ) для указанных районов согласуются между собой. Все тренды положительны, наибольшее потепление наблюдается зимой и весной, наименьшее – летом. Тренды средних сезонных значений ПТВ на Шпицбергене и на ЗФИ также согласуются между собой. Тренды среднегодовых и средних сезонных значений ПТВ статистически значимы на уровне 0,01 и 0,05. Рассчитанные скорости потепления для Баренцбурга выше аналогичных оценок для Лонгйира [1], поскольку ряд Баренцбурга (1911-2020 гг.), по сравнению с Лонгйиром (1900-2014 гг.), дополнен шестью годами 2015-2020 гг., четыре из которых (2015, 2016, 2017 и 2018 гг.) были особенно теплыми и входят в десятку самых теплых лет за всю историю наблюдений на архипелаге. Удлинение рядов значениями ПТВ, относящимися к особенно теплым годам, приводит к увеличению оценки общего потепления. Потепление в Лонгйире для периода 1900-2014 гг. составляет 2,9 °С, для периода 1899-2018 гг. – 3,8 °С, для Баренцбурга (1912-2020 гг.) – 4,0 °С [1], а для ЗФИ (1929-2017 гг.) – 1,8 °С [2].

### Литература:

1. Карандашева Т. и др. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге в XX-XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы. Российская Арктика. 2021, №2(13), СС. 25-38 DOI: 10.24412/2658-4255-2021- 2-25-38.
2. Ivanov B. et.al. Assessment of long-term changes surface air temperature from the High Arctic archipelago Franz Joseph Land from 1929 to the present (2017) // Czech Polar Report, 2021, №11 (1). PP. 114-133 DOI: 10.5817/CPR2021-1-9 <http://www.sci.muni.cz/CPR/>

## **Формирование экстремальных температур воздуха в районе Шпицбергена в холодный период года**

Ильющенкова И.А.<sup>1</sup>, Коржиков А.Я.<sup>1</sup>, Иванов Б.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

[IraL122@mail.ru](mailto:IraL122@mail.ru)

**Ключевые слова:** температура воздуха, арх. Шпицберген, Западная Арктика, синоптические процессы, циркумполярный вихрь, ледяной покров, прогноз

Рассматривается связь колебаний средних приземных температур воздуха за период 1912–2022 гг. в районе арх. Шпицберген с особенностями макросиноптических процессов над северной полярной областью. Особое внимание уделено изучению взаимосвязи экстремально низких и экстремально высоких средних температур воздуха в холодный период года (с октября по май) с особенностями атмосферной циркуляции. Периоды с экстремально низкими температурами наблюдались, в основном, в начале XX века, периоды с экстремально высокими температурами стали отмечаться с 2005 г. Для холодных периодов с экстремально низкими температурами характерна локализация циркумполярного вихря в евразийском секторе Арктики, при которой для приземного поля давления типично возникновение антициклональной области в Гренландском секторе арктических широт. Это приводит к адвекции холодных воздушных масс из Арктики и, как следствие, формированию в районе арх. Шпицберген значительных отрицательных аномалий температуры воздуха. При формировании экстремально высоких температур воздуха в районе арх. Шпицберген определяющую роль играют те макросиноптические процессы, при которых циркумполярный вихрь локализуется над Канадским арктическим архипелагом. При этом происходит углубление исландской депрессии в районе ее средней многолетней локализации. Последнее обстоятельство приводит к возникновению мощной адвекции теплых атлантических воздушных масс в район арх. Шпицберген и формированию здесь положительных аномалий температуры воздуха. Экстремальные по температуре воздуха холодные периоды года влияют на формирование ледяного покрова, как в районе Шпицбергена, так и в прилегающих арктических морях.

Работа выполнена в рамках проекта «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген» (проект 5.1 НИТР Росгидромета, 2020–2024 гг.).

## **Водяные смерчи в России и в мире: климатология, условия возникновения, характеристики и возможности прогноза**

Калмыкова О.В.

*Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия*

[indigook@yandex.ru](mailto:indigook@yandex.ru)

**Ключевые слова:** *водяные смерчи, климатология, характеристики, прогноз*

Водяной смерч – интенсивный вертикальный часто воронкообразный вихрь небольших горизонтальных размеров (от 3 до 150 м), возникающий над поверхностью воды из кучевого облака. На земном шаре водяные смерчи чаще всего возникают в экваториальных водах Атлантического и Индийского океанов, в Мексиканском заливе и в Средиземном море. В России смерчи регистрируют в Черном и Балтийском морях, у побережья Приморья и о. Сахалин. По данным Международного центра по исследованию водяных смерчей в 2021 г. на Земле отмечалось более 1000 случаев их появления. В России в Черном море ежегодно возникают около 50 смерчей.

Водяные смерчи принято классифицировать на немезоциклонные и мезоциклонные. Первые обусловлены концентрацией завихренности в приводном слое с последующим ее «вытягиванием» вверх к нижней границе материнского облака. Вторая группа смерчей формируется за счет распространения мезоциклонического вращения в облаке вниз к поверхности воды. Подавляющее большинство водяных смерчей на Земле являются немезоциклонными.

Время жизни немезоциклонных водяных смерчей, как правило, не превышает 20 минут. Вертикальная скорость в смерчах варьируется от 5 до 10 м/с. По данным прямых самолетных измерений установлено, что скорость вращения на внешней границе ядра вихря не превышает 28.1 м/с [2]. Несколько более высокие оценки скорости в 29.6 м/с были получены по данным лидарных измерений [3]. Падение давления в центре вихря варьируется от 1 до 10 мб. В ядре отмечается положительная аномалия температуры в 0.3 К.

Известные на сегодняшний момент подходы к прогнозу водяных смерчей опираются на выявление условий благоприятных для их возникновения с учетом накопленного опыта их наблюдения. При этом анализируются данные аэрозондирования, спутниковые и радиолокационные данные, а также прогнозы стандартных метеопараметров [1]. В России для прогноза водяных смерчей над Черным морем автором был разработан региональный индекс смерчопасности.

### ***Литература:***

1. Devanas, A. Stefanova L. Statistical Prediction of Waterspout Probability for the Florida Keys // Weather and Forecasting. – 2018. – V. 33. – P. 389 – 410.
2. Levenson, V.H., Sinclair P.C. Waterspout Wind, Temperature and Pressure Structure Deduced from Aircraft Measurements // Monthly Weather Review. - 1977. – V. 105. – P. 725 – 733.
3. Schwieson, R.L. Horizontal Velocity Structure in Waterspouts // Journal of Applied Meteorology. – 1981. – V. 20. – P. 349 – 360.

## **Влияние вращения Земли на общую циркуляцию атмосферы**

**Кочин А.В.**

*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область  
[amarl@mail.ru](mailto:amarl@mail.ru)*

**Ключевые слова:** *общая циркуляция атмосферы, вращение Земли, полярная и тропическая тропопаузы, поверхность раздела*

Процессы в атмосфере зависят от многих факторов, включая вращение Земли (4), что учитывается путем введения геопотенциальной высоты. Влияние горизонтальной составляющей центростремительного ускорения (ГСЦУ) обычно не учитывается (3), хотя эти компоненты близки по величине. В работе анализируется механизм образования циркуляции из-за негидростатического градиента давления, возникающего в результате ГСЦУ (1). Оценка влияния ГСЦУ для изотермической атмосферы с постоянной температурой показала, что давление на полюсе было бы равно 0,27 от давления на экваторе, при этом атмосфера будет находиться в состоянии равновесия. Градиент давления за счет ГСЦУ около 7 Па/км, что сопоставимо с градиентами давления в циклонах и антициклонах. Неравномерно нагретый воздух не может находиться в состоянии равновесия и движется в меридиональном направлении. Смена знака градиента давления в статическом состоянии происходит при равенстве ГСЦУ и градиента гидростатического давления. Высота их раздела пропорциональна квадрату угловой скорости вращения Земли, квадрату радиуса Земли, косинусу широты и температуре и обратно пропорциональна разнице температур между экватором и полюсом и величине ускорения свободного падения. Воздух, расположенный ниже поверхности с нулевым градиентом, будет смещаться в сторону экватора, а выше в сторону полюса. Сила вязкого трения о поверхность уравнивает ГСЦУ, что вызывает уменьшение высоты раздела потоков. Выше поверхности раздела вязкое трение и ГСЦУ суммируются, что приводит к образованию второй ячейки циркуляции вокруг тропической тропопаузы. Полная циркуляция состоит из трех противоположно направленных потоков, разделенных по вертикали полярной и тропической тропопаузой. Данные аэрологического зондирования показывают соответствие между предлагаемой моделью и данными зондирования по характеру изменения направления ветра в тропопаузах. Химический состав и оптические свойства атмосферы также резко изменяются в районе тропопаузы (2).

### ***Литература:***

1. Kochin A.V. Earth's Rotation Causes Global Atmospheric Circulation. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2206/2206.14887.pdf>  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.14887>
2. Kochin & al. 2021. Examination of Optical Processes in The Atmosphere During Upper Air Soundings. JAOT. DOI: 10.1175/JTECH-D-20-0158.1 2.
3. Прандтль Л. Гидроаэромеханика.. 2000.
4. Сидоренков Н.С. 2004. Нестабильность вращения Земли. Вестник РАН. – 2004. –Т. 74. – № 8. – С.701 – 715. ISSN: 0869-5873

## Предварительные результаты учета реального распределения типов подстилающей поверхности в регионе Санкт-Петербурга

Ладохина Е.М.<sup>1,2,3</sup>, Рубинштейн К.Г.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>МикроСтен-МИС, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Северо-Западное УГМС, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

[katur.job@mail.ru](mailto:katur.job@mail.ru)

**Ключевые слова:** численный прогноз погоды, локальные климатические зоны

В современных численных моделях атмосферы для адекватного описания турбулентных потоков в приземном слое города разработаны физические параметризации городского полога [1]. Для их использования требуется определить значения параметров, описывающих свойства подстилающей поверхности. В контексте этой задачи широкое распространение получил подход, основанный на концепции локальных климатических зон [2] (ЛКЗ). Выделение ЛКЗ позволяет охарактеризовать многообразие сочетаний городской застройки и земельного покрова в городах ограниченным числом классов, в пределах которых значения параметров подстилающей поверхности остаются постоянными.

Для представления подстилающей поверхности региона Санкт-Петербург в численной прогностической модели были использованы данные портала WUDAPT [3]. Полученная карта реального распределения свойств подстилающей поверхности, была адаптирована к расчетной области моделирования и усвоена в файлы препроцессинга модели. Численные эксперименты с параметрами подстилающей поверхности, заданными по умолчанию для каждой ЛКЗ, проведены за интервал с 1 по 30 июня 2021 г. Для оценки пространственной изменчивости приземной температуры в пределах Санкт-Петербурга были собраны данные с 8 автоматических метеорологических датчиков в различных районах города. Среднее абсолютное отклонение данных наблюдений с датчиков от данных наблюдений на станции «ОГМС Санкт-Петербург» (отражающей погодный режим города в целом) за выбранный временной интервал составляет 1,8 °С, что демонстрирует изменчивость распределения приземной температуры в различных районах города.

Среднее отклонение прогностических значений приземной температуры от фактических в среднем по всем станциям было отрицательным и составило -3,3 °С. При этом наибольшее отклонение наблюдалось для датчика в районе среднеэтажной застройки: - 5,2 °С; наименьшее отклонение - для датчика в зоне плотной многоэтажной застройки: - 1,2 °С.

### Литература:

1. Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models // Bound-lay. Meteorol. 2000. V. 94, N 3. P. 357–397.
2. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies // B. Am. Meteorol. Soc. 2012. V. 93, N 12. P. 1879–1900.
3. Ching J. et al. WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene // B. Am. Meteorol. Soc. 2018. V. 99, N 9. P. 1907–1924.

## **Оценка интервальной устойчивости климата среднего Плейстоцена при помощи эмпирической модели**

Лоскутов Е.М., Вдовин В.В., Клиньшов В.В., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н., Фейгин А.М.  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия  
[loskutov@ipfran.ru](mailto:loskutov@ipfran.ru)

**Ключевые слова:** климатические процессы, интервальная устойчивость, среднеплейстоценовый переход, эмпирическое моделирование

Интервальная устойчивость — новый метод исследования сложных динамических систем, позволяющий оценить их устойчивость к сильным возмущениям. Этот метод [1] описывает, насколько большим должно быть возмущение, чтобы разрушить устойчивый динамический режим, установившийся в системе. В этой работе интервальная устойчивость впервые используется для изучения свойств реальной природной системы: для анализа устойчивости климатической системы Земли за последние 2,6 млн лет. Главным резким сдвигом глобального климата в этот период является среднеплейстоценовый переход (СПП), произошедший около миллиона лет назад и заключающийся в изменении периодичности ледниковых циклов с 41 до 100 тыс. лет. На основе эмпирической нелинейной стохастической модели, предложенной в работе [2], мы показываем, что устойчивость глобального климата к любым возмущениям снижается на протяжении всего плейстоценового периода.

Работа выполнена в рамках Программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего», проект №075-02-2020-1483/1.

### ***Литература:***

1. Klinshov V. V., Kirillov S., Kurths J., and Nekorkin V. I., “Interval stability for complex systems,” *New Journal of Physics* 20, 043040 (2018).
2. Mukhin D., Gavrilov A., Loskutov E., Kurths J., Feigin A., “Bayesian Data Analysis for Revealing Causes of the Middle Pleistocene Transition,” *Scientific Reports* 9 (2019).

## **Новая система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России на основе модели атмосферы ПЛАВ и ансамблевого фильтра Калмана с переходом в пространство ансамбля**

Мизяк В.Г.<sup>1</sup>, Толстых М.А.<sup>1,2</sup>, Алипова К.А.<sup>2</sup>, Рогутов В.С.<sup>1</sup>, Гойман Г.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия  
[vmizyak@gmail.com](mailto:vmizyak@gmail.com)

**Ключевые слова:** моделирование атмосферы, ансамблевый прогноз, усвоение данных

Система ансамблевого прогноза погоды позволяет учесть неопределенности начальных данных прогностической модели, неопределенности самой модели, а также оценить вероятность наступления метеорологических явлений.

В Гидрометцентре России и ИВМ РАН разработана новая система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды, основанная на глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ [1] и системе усвоения данных на основе алгоритма локального фильтра Калмана с переходом в пространство ансамбля (далее – LETKF) [2].

Учет неопределенности начальных данных обеспечивается ансамблевой системой усвоения данных. Для повышения точности поля средних по ансамблю начальных данных заменяются на соответствующие поля оперативного анализа Гидрометцентра России, содержащие данные спутниковых наблюдений, которые не могут быть вертикально локализованы в пространстве и усвоены в ансамблевой системе усвоения. При этом отклонения каждого участника ансамбля от среднего по ансамблю остаются неизменными.

Учёт неопределенности модели реализован путём стохастического возмущения параметров в блоке параметризаций процессов подсеточного масштаба (SPP) и стохастическим возмущением правых частей уравнений притока тепла и вертикального компонента абсолютной завихренности (SPPT).

По результатам оперативных испытаний отмечено преимущество новой системы ансамблевых прогнозов над ранее использовавшейся системой, разработанной под руководством Е.Д. Астаховой. Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета созданная система рекомендована к оперативному использованию.

### ***Литература:***

1. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Триада лтд., 166 стр.
2. A.V. Shlyayeva, M.A.Tolstykh, V.G.Mizyak, V.S.Rogutov. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model. Russ. J. Num. An. & Math. Mod. 2013 V 28 N 4 P 419

## **Изменчивость турбулентных потоков тепла синоптического масштаба на поверхности океанов Северного полушария с 1979 по 2018 гг.**

Морару Е.И.<sup>1</sup>, Логинов С.В.<sup>1</sup>, Харюткина Е.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Центр научных исследований и разработок, Великий Новгород, Россия*

[MoraruEI@yandex.ru](mailto:MoraruEI@yandex.ru)

**Ключевые слова:** *турбулентные потоки тепла, синоптическая изменчивость, Атлантический океан, Тихий океан*

Целью работы являлось исследование пространственно-временной изменчивости потоков явного (SH) и скрытого (LE) тепла в океанах Северного полушария за период 1979–2018 гг., а также оценка вклада флуктуаций синоптического масштаба (СИ) в общую изменчивость потоков тепла в зимний сезон.

Исследование проводилось по срочным данным реанализа ERA-Interim.

Оценка вклада флуктуаций потоков LE и SH масштаба СИ, проводилась с помощью фильтрации исходных временных рядов по [1]. Вклад флуктуаций СИ масштаба в изменчивость потоков тепла рассчитывался по коэффициенту детерминации.

В целом в Атлантическом и Тихом океанах в начале XXI в. происходит увеличение величины потоков тепла на среднемесечном временном масштабе и их уменьшение на синоптическом.

В средних широтах океанов теплообмен на границе между океаном и атмосферой осуществляется преимущественно на синоптическом временном масштабе. За период 1999–2018 гг., по сравнению с периодом 1979–1998 гг., происходит уменьшение количества областей с максимальным вкладом флуктуаций масштаба СИ в общую изменчивость SH и LE, а также их смещение в восточную часть Атлантического океана (до 62%) и в центральную часть Тихого океана (до 93%).

Это в первую очередь связано с изменением меридиональной циркуляции, вызванным динамикой центров действия атмосферы в последние десятилетия [2]. Получено, что на южных границах указанных районов наблюдается значимое количество флуктуаций с экстремальными значениями меридиональной компоненты скорости ветра ( $v$ ) масштаба СИ. В начале XXIV в. их количество уменьшается, что согласуется с сокращением вклада флуктуаций в изменчивость потоков тепла. Выявленная тенденция проявляется преимущественно для отрицательных флуктуаций интенсивностью  $3\sigma$  (средние широты Тихого океана) и  $4\sigma$  (средние широты Атлантического океана). Полученные тенденции сопоставлялись с оценками трендоустойчивости.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300154-1 и за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10052.

### **Литература:**

1. Podnebesnykh N.V., Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Usova (Moraru) E.I. Vortex circulation and anomalous meteorological phenomena over the Asian territory of Russia in the context of climate change // Proc. SPIE. – 2019. – Vol. 11208. – P. 1120883.
2. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов А.М. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: особенности и изменчивость // Метеорология и гидрология. 2020. – № 11. – С. 5–23.

## **Фазовый сдвиг между изменениями глобальной приповерхностной температуры и содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере по расчетам с ансамблем моделей CMIP6**

Мурышев К.Е.<sup>1,2</sup>, Елисеев А.В.<sup>1,2</sup>, Мохов И.И.<sup>1,2</sup>, Тимажев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[kmuryshev@mail.ru](mailto:kmuryshev@mail.ru)

**Ключевые слова:** причинно-следственные связи, парниковый эффект, глобальное потепление, углеродный цикл, климатические модели

По данным ледовых кернов, реконструкциям для последнего тысячелетия и данным наблюдений отмечается общее запаздывание изменений содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере  $q$  относительно соответствующих изменений глобальной приповерхностной температуры  $T$ . Аргумент «следствие не может опережать причину» часто используется для критики современного обоснования глобального потепления, согласно которому основной причиной роста  $T$  в последние десятилетия является антропогенное увеличение  $q$ . При этом подобное запаздывание изменений  $q$  относительно изменений  $T$  может быть получено в численных расчетах с климатическими моделями, в которых современные изменения климата обусловлены антропогенными воздействиями, в частности увеличением содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере.

В данной работе проанализированы фазовые сдвиги между изменениями  $T$  и  $q$  в численных расчетах с моделями Земной системы ансамбля CMIP6 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6) при сценариях “historical” и “esm-pi-CO2pulse”. При выделении высокочастотных компонент из рядов  $T$  и  $q$  в численных экспериментах “historical” и исследовании фазовых соотношений между ними получается, что высокочастотная компонента изменений  $T$  опережает соответствующую компоненту изменений  $q$ . При этом, согласно условиям численных экспериментов изменения  $T$  являются следствием изменений  $q$ , а не их причиной. Согласно же результатам численных экспериментов “esm-pi-CO2pulse”, условия которых предполагают наличие ярко выраженных экстремумов в рядах для  $T$  и  $q$ , экстремум  $q$  опережает экстремум для  $T$ .

Согласно результатам расчетов с моделями CMIP6 фазовые сдвиги между изменениями  $T$  и  $q$  могут быть как положительными, так и отрицательными в зависимости от условий численных экспериментов. Это свидетельствует о том, что для определения характера причинно-следственной связи между климатическими переменными необходимо привлечение информации о структуре климатической системы (в том числе, об особенностях климатических процессов) и типе внешнего воздействия на нее.

## **Идентификация и анализ режимов циркуляции атмосферы средних широт на основе данных**

Мухин Д.Н.

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*  
[mukhin@ipfran.ru](mailto:mukhin@ipfran.ru)

**Ключевые слова:** *режимы циркуляции атмосферы*

Циркуляция атмосферы в средних широтах характеризуется хаотической динамикой, имеющей небольшой горизонт прогнозирования. В то время как движения структур синоптического масштаба хорошо предсказываются на 1-2 недели, прогноз динамики более крупных пространственно-временных структур является проблематичным. Такая динамика, называемая низкочастотной изменчивостью атмосферы, характеризуется повторяющимися долгоживущими паттернами планетарного масштаба, которые, модулируя зональные течения, определяют режимы погоды над обширными территориями. В докладе представлен метод анализа данных, направленный на решение двух ключевых для моделирования динамики таких структур задач: (1) идентификация глобальных повторяющихся паттернов (мод) и (2) построение динамических переменных для эффективного описания их динамики. Сложность динамики атмосферы в сочетании с ограниченными по времени выборками доступных данных приводят к тому, что даже по первой задаче разными научными группами получаются противоречивые результаты. В представляемом методе обе указанные задачи решаются в рамках одной процедуры, в основе которой лежит матрица расстояний, характеризующих близость состояний системы в различные моменты времени. При идентификации мод эта матрица используется для построения и разбиения на сообщества графа состояний. При построении динамических переменных она лежит в основе нелинейного анализа главных компонент, дающего пространство, в котором найденные моды хорошо разделены. Возможности метода демонстрируются на примере анализа пространственно-распределенных временных рядов геопотенциальных высот в Северном полушарии за период с 1950 года по настоящее время. Обсуждаются найденные наборы мод, их динамические характеристики, влияние на режимы погоды и связь с климатическими форсингами. Кроме того, представлено сравнение результатов, полученных по данным реальных измерений и данным глобальных климатических моделей. Работа поддержана РНФ (грант 22-12-00388).

## Влияние колебания Маддена-Джулиана на атмосферную циркуляцию в умеренных широтах Северного полушария

Набокова Е.В.<sup>1</sup>, Куликова И.А.<sup>1</sup>, Субботин А.В.<sup>1</sup>, Емелина С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[e.nabokova@gmail.com](mailto:e.nabokova@gmail.com)

**Ключевые слова:** колебание Маддена-Джулиана, индекс RMM, дальние связи

Рассматриваются вопросы, связанные с влиянием осцилляции Маддена-Джулиана (ОМД) на особенности атмосферных процессов в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария. Для характеристики ОМД используются суточные данные спутниковых наблюдений NCEP/NOAA об уходящей длинноволновой радиации, а также реанализы ЕЦСПП (ERA5) зональной составляющей скорости ветра на уровне поверхностей 850 гПа и 200 гПа в пределах 15 с.ш. – 15 ю.ш. на сетке 2.5 на 2.5 градуса за период с 1990 по 2012 гг. (8418 случаев). С помощью факторного анализа данные поля отображаются в двумерном фазовом пространстве, координатами которого являются первые два фактора, объясняющие более 30% общей дисперсии (индекс RMM). Для количественной оценки внутрисезонной изменчивости атмосферы в умеренных широтах используются индексы «дальних связей», позволяющие идентифицировать режимы зонального потока и режимы типа блокирования. Результаты дисперсионного анализа обнаруживают влияние ОМД на погодные режимы в умеренных широтах на интервалах времени порядка 5 - 10 суток. Наиболее четкое проявление сигнала, связанного с ОМД, отмечается в Тихоокеанско-Североамериканском регионе (индексы PNA и WP), а также в Северной Азии (индексы EU и POL). При этом «энергоактивные» регионы, связанные с активной фазой конвекции, расположены на акватории Индийского и на западе Тихого океана. Влияния ОМД на циркуляцию в Атлантико-Европейском регионе не столь четко выражено и носит довольно сложный характер, который требует рассмотрения дополнительных факторов. При этом усиливается роль появления активных ячеек конвекции в Атлантике и Африке. Делается вывод, что именно географическое положение конвективных и циркуляционных ячеек в тропиках определяет их влияние на атмосферную циркуляцию в умеренных широтах, а амплитуда колебания может только усилить (или ослабить) это воздействие.

Работа выполнена при финансовой поддержке МинОбрНауки РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

## **Модельные оценки зависимости интенсивности холодных вторжений в Баренцевом море от ледовой обстановки и температуры поверхности океана**

Нарижная А.И.<sup>1</sup>, Чернокульский А.В.<sup>1</sup>, ДёртеХандорф<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Потсдам, Германия  
[augustea@mail.ru](mailto:augustea@mail.ru)*

**Ключевые слова:** холодные вторжения, Арктика, данные моделирования, Баренцево море, ледовый покров, температура поверхности океана, модельные эксперименты

Получены количественные оценки характеристик холодных вторжений (ХВ) на юге Баренцева моря по данным численных экспериментов с моделью атмосферы с различными граничными условиями – низкой и высокой концентрацией морского льда (КМЛ) и низкой и высокой температурой поверхности океана (ТПО).

Проанализированы данные 4 численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ЕСНАМ6. В экспериментах (по 100 лет каждый), в качестве граничных условий в модель подавались различные значения температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации морского льда (КМЛ) — низкая и высокая ТПО (соответствует ТПО за 1979–1983 и 2002–2006 соответственно), низкая и высокая КМЛ (соответствует КМЛ за 1979–1983 и 2005–2009, соответственно). Оценен годовой ход для 4 экспериментов (среднее и СКО для каждого месяца), рассчитана статистическая значимость различий между экспериментами (t-критерий Стьюдента).

В качестве метрики для выделения ХВ использовался индекс М, оцененный как разность потенциальной температуры на поверхности и на уровне 800 гПа. Холодным вторжением считалась область, состоящая как минимум из 8 модельных ячеек с положительным значением М. Выделялись слабые (индекс М от 0 до 3 К), умеренные (М от 3 до 6 К) и сильные ХВ (М больше 6 К).

Показано, что на значения индекса М существенно большее влияние оказывает КМЛ по сравнению с ТПО. В экспериментах с малой КМЛ на юге Баренцева моря отмечаются более высокие значения индекса М (до 30%) по сравнению с экспериментами с высокой КМЛ. При этом, в экспериментах с высокой КМЛ получены более низкие средние значения индекса М, но более сильная межгодовая изменчивость. Статистические различия (на 95% уровне значимости) проявляются между парами с различной КМЛ в период с января по май. При этом статистически значимые различия в экспериментах с одинаковыми условиями КМЛ, но различным ТПО отмечены только для октября.

### **Литература:**

1. Jaiser R. et al. Separating the impact of sea ice and sea surface temperature changes on Arctic climate and its linkages to mid-latitudes //Geophysical Research Abstracts. – 2019. – Т. 21.

## **Характеристики поля ветра верхней тропосферы как индикаторы климатической изменчивости**

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

Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

[nerushev@rpatyphoon.ru](mailto:nerushev@rpatyphoon.ru)

**Ключевые слова:** ветер, струйные течения, верхняя тропосфера, пространственно-временная изменчивость, спектральный и вейвлетный анализ, климатические изменения

Представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости горизонтальной скорости ветра и характеристик струйных течений верхней тропосферы Северного полушария на временном интервале 2007-2021 годы. Экспериментальной основой исследования служили данные измерений радиометра SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения. Значения горизонтальной скорости ветра и характеристики струйных течений вычислялись по перемещению неоднородностей концентрации водяного пара.

Рассмотрены межгодовая изменчивость среднемесячных значений скорости ветра и характеристик струйных течений и их связь с основными климатическими параметрами и крупномасштабными атмосферными процессами. На основе корреляционного и кросс-вейвлетного анализов отмечены общие закономерности связи временной изменчивости скорости ветра и характеристик высотных струйных течений с изменчивостью площади арктического морского льда и температурными характеристиками тропосферы.

Выявлена особенность временной изменчивости усредненного по площади модуля скорости ветра, состоящая в изменении знака тренда на рубеже 2015-2017 гг. с положительного на отрицательный. Максимальные по модулю значения как положительного, так и отрицательного тренда отмечаются над Атлантикой.

На основе анализа связи изменчивости скорости ветра и высотных струйных течений с основными климатическими характеристиками и крупномасштабными атмосферными процессами предложена схема влияния ускоряющегося сокращения площади арктического морского льда, связанного с глобальным потеплением, на характеристики поля ветра в свободной атмосфере.

## **Оценка стационарности поля завихренности субтропических антициклонов для определения возможности применения к ним методики индивидуальных вихрей**

Несвятитаска А.И., Железнова И.В.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
[anastasianesvatipaska@gmail.com](mailto:anastasianesvatipaska@gmail.com)

**Ключевые слова:** *уравнение бюджета завихренности, индивидуальный вихрь, субтропические антициклоны, EOF-разложение*

Одним из подходов для анализа динамики циркуляционных систем в атмосфере является методика, связанная с исследованием так называемых индивидуальных вихрей [1]. Вихрь рассматривается как целостная структура, а анализ составляющих уравнения, описывающего его динамику, позволяет оценить, какие атмосферные процессы наиболее заметно влияют на изменение завихренности в циркуляционной системе. В рамках данного подхода исследуется атмосферный вихрь, существующий в течение длительного времени в некоторой области. В таком случае пространственная структура поля завихренности может быть описана небольшим количеством мод разложения на эмпирические ортогональные функции. В реальной атмосфере примерами таких стабильных объектов могут быть блокирующие антициклоны умеренных широт или субтропические антициклоны.

Применение методики к субтропическим антициклонам на примере Гавайского максимума показало, что пространственная структура поля завихренности субтропических антициклонов, хорошо выраженная на среднеклиматических картах, отличается существенной изменчивостью при исследовании ежедневных данных [2]. Однако можно выделить длительные периоды времени, в течение которых субтропические антициклоны существуют в определенной области, что позволяет применить методику индивидуальных вихрей.

Целью данной работы является оценка межгодовой и внутрисезонной стационарности поля завихренности Гавайского, Азорского, Маскаренского, Южно-Атлантического и Южно-Тихоокеанского антициклонов с целью подбора наиболее подходящих объектов для дальнейшего анализа с помощью методики индивидуальных вихрей. На основе данных реанализа ERA5 определены средние климатические характеристики завихренности в субтропических антициклонах в период 1979-2021 гг, межгодовая изменчивость интенсивности и локализации каждого из исследуемых объектов, внутрисезонная изменчивость в летний период для каждого полушария, а также оценены временные тренды интенсивности поля завихренности в последние десятилетия.

### ***Литература:***

1. Кислов А. В. и др. Анализ вихря как целостного образования применительно к исследованию блокирующего антициклона 2010 г // Метеорология и гидрология. – 2017. – №. 4. – С. 18-26.
2. The vorticity budget of an individual atmospheric vortex for the hawaiian high / I. Mukhartova, I. Zheleznova, A. Nesvyatipaska, A. Kislov // Environmental Sciences Proceedings. — 2022. — Vol. 19, no. 4.

## **Оценки изменения снежного покрова в Евразии по расчетам с глобальными климатическими моделями и данным наблюдений**

Парфенова М.Р.<sup>1</sup>, Аржанов М.М.<sup>1</sup>, Мохов И.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[parfenova@ifaran.ru](mailto:parfenova@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *снежный покров, приповерхностная температура, спутниковые данные, модельный прогноз, внутрисезонная изменчивость, межгодовая изменчивость*

Представлены оценки изменения площади снежного покрова в Евразии в связи с изменениями приповерхностной температуры на основе результатов расчетов с глобальными климатическими моделями международного проекта CMIP6 в сопоставлении со спутниковыми данными CDR для нескольких последних десятилетий. Наряду с корреляционным анализом использовался кросс-вейвлетный анализ и анализ фазовых портретов. Проведено сравнение оценок чувствительности снежного покрова к температурным изменениям для разных периодов, в том числе для 1980–1999 гг. и 2000–2019 гг. На основе результатов расчетов с ансамблем моделей CMIP6 получены оценки изменений снежного покрова в Евразии в 21 веке, в частности при сценарии SSP2-4.5. Отмечены сезонные особенности взаимосвязи снежного покрова с температурным режимом.

## **Сезонные перестройки циркуляции во внетропической зоне стратосферы в период 1979–2020 гг.**

Переведенцев Ю.П., Исмагилов Н.В., Николаев А.А., Шанталинский К.М.  
*Казанский федеральный университет, Казань, Россия*  
[ypereved@kpfu.ru](mailto:ypereved@kpfu.ru)

**Ключевые слова:** *циркуляция атмосферы, стратосфера, сезонные перестройки*

В настоящей работе сезонные перестройки СЦ рассмотрены в период 1979–2020 гг. на изобарических поверхностях 30, 20 и 10 гПа в зоне 30–90°с.ш., что позволило заметно пополнить ряды ранних, средних и поздних перестроек. Методика определения дат весенних перестроек рассмотрена в работе [1]. Предварительно были исследованы особенности динамики термического режима в слое атмосферы от уровня Земли до высоты 48 км (1 гПа) в широтной зоне 30 – 90°с.ш. в период 1979 – 2020 гг. поданным реанализа ERA5.

Анализ дат весенних перестроек СЦ и их межгодовой изменчивости выявил следующие закономерности в рассматриваемый период.

В слое 10–30 гПа весенняя перестройка циркуляции чаще всего происходит сверху вниз (в 29 случаях из 42), что находит свое отражение в средних многолетних значениях дат перестроек: 18 апреля на уровне 10 гПа, 19 апреля на уровне 20 гПа и 23 апреля на уровне 30 гПа.

Сроки весенних перестроек на уровнях 10 и 20 гПа достаточно близки между собой и в 33 случаях из 42 разница в сроках по модулю не превышает 3 дней. Коэффициент линейной корреляции между датами перестроек на уровнях 10 и 20 гПа составляет 0,97.

Сроки весенних перестроек на уровнях 10 и 30 гПа отличаются сильнее, в отдельные годы разница может достигать 22–25 и даже 40 дней (1992 год). Поздние перестройки происходят более синхронно на рассматриваемых трех уровнях; разница в датах не превышает 10 дней. Коэффициент линейной корреляции между датами перестроек на уровнях 10 и 30 гПа составляет 0,84.

В многолетнем ходе отмечается слабый тренд смещения дат весенних перестроек на более поздние сроки, а осенью наоборот к более ранним.

Выявлена связь весенних перестроек с характером зимних внезапных стратосферных потеплений, солнечной активностью и тихоокеанской декадной осцилляцией, что свидетельствует об их сложной физической природе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ (проект № 22-27-20080).

## Модельный архив COSMO-CLM для Российской Арктики 1980–2016: технология создания, оценки качества воспроизведения приземных температуры воздуха и скорости ветра и перспективы дальнейших исследований

Платонов В.С.<sup>1</sup>, Варенцов М.И.<sup>2</sup>, Шестакова А.А.<sup>3</sup>, Бойко А.П.<sup>1</sup>, Дунцев С.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, кафедра метеорологии и климатологии, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

[vplatonov86@gmail.com](mailto:vplatonov86@gmail.com)

**Ключевые слова:** COSMO-CLM, модельный архив, изменения климата Арктики, термические индексы ETCCDI, экстремальные скорости ветра

Детализированный модельный архив для Российской Арктики был создан на основе длительных экспериментов с негидростатической моделью COSMO-CLM v5.05 на период 1980–2016 гг. с горизонтальным шагом сетки  $\sim 12$  км, и включает в себя около сотни гидрометеорологических величин на поверхности и 50 модельных уровнях [1]. Данные модельного архива частично выложены в открытый доступ на репозитории Figshare [2]. Сравнение с данными станций Росгидромета показало, что средние ошибки скорости ветра составляют  $\pm 2$  м/с, и до  $-5$  м/с для 95% квантилей. Максимальные ошибки по температуре достигают  $-4^\circ\text{C}$ , а для 1% квантилей не превышают  $-6^\circ\text{C}$ . Анализ термических индексов показал, что архив COSMO-CLM существенно занижает интенсивность адвекций холода, в меньшей степени – адвекций тепла в горных районах. Многолетние тренды по COSMO-CLM продемонстрировали значимый рост средних температур зимой, абсолютных минимумов температуры и снижение её средней суточной амплитуды.

Повторяемость и статистические характеристики экстремальных скоростей ветра в регионах Новой Земли и Шпицбергена лучше воспроизводятся по Arctic System Reanalysis (ASRv2), чем по архиву COSMO-CLM. Однако, архив COSMO-CLM в отдельных случаях оказывается лучше для максимальной скорости ветра и значений наибольших квантилей при сравнении с данными радаров с синтетической апертурой (SAR) на Radarsat-2. Более детальные оценки случаев методом Fraction Skill Score показали, что архив COSMO-CLM воспроизводит мезопроцессы  $\beta$ -масштаба, однако  $\gamma$ -масштаб не воспроизводится, пространственная структура полей скорости ветра более 15–20 м/с улавливается недостаточно.

Дальнейшие планы использования модельного архива COSMO-CLM включают в себя его продление до 2019 года; расширение доступа к данным; статистические и климатологические оценки экстремальных и опасных погодных явлений в Арктике по спутниковым данным; оценки трендов; сравнения с другими базами данных и реанализами; даунскейлинг отдельных случаев с более высоким разрешением и др.

### Литература:

1. Platonov V., Varentsov M. Introducing a new detailed long-term COSMO-CLM hindcast for the Russian Arctic and the first results of its evaluation // Atmosphere. — 2021. — Vol. 12, no. 3. — P. 350.
2. Platonov, V., Varentsov, M. Russian Arctic COSMO-CLM hindcast over 1980–2016 period. // figshare. – Collection. – 2020.

**Влияние московской агломерации на опасные  
атмосферные явления конвективного характера:  
результаты моделирования с высоким разрешением**

Платонов В.С.<sup>1</sup>, Чернокульский А.В.<sup>2</sup>, Варенцов М.И.<sup>1,2</sup>, Шихов А.Н.<sup>3</sup>, Ярынич Ю.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия  
[julia.yarinich@yandex.ru](mailto:julia.yarinich@yandex.ru)

**Ключевые слова:** мезомасштабное моделирование, параметризация городской подстилающей поверхности, смерч, шквал, град, экстремальные осадки

В теплое время года в Московском регионе регулярно наблюдаются конвективные опасные явления погоды (КОЯП), такие как шквалы, ливни, крупный град и смерчи [1]. Московская агломерация, модулируя потоки тепла и влаги, может оказывать усиливающее воздействие на подобные явления. Для оценки этого влияния был использован многолетний (за летние сезоны 2007–2016 гг.) массив данных, полученных с помощью двух экспериментов с мезомасштабной моделью COSMO-CLM высокого разрешения (с шагом 1 км) — с параметризацией городской подстилающей поверхности TERRA\_URB и без неё (URB и noURB, соответственно). Этот модельный архив ранее успешно применялся в исследовании создаваемых Московским мегаполисом аномалий в полях температуры, влажности воздуха, скорости ветра, и позволил диагностировать увеличение над городом сумм летних осадков [2].

Проанализированы максимальная приземная скорость ветра, вертикальная составляющая скорости ветра на разных уровнях, интенсивность и сумма осадков, индексы экстремальности для ветра и осадков, а также параметр Updraft Helicity (UH25), используемый для идентификации мезоциклонов. Характеристики распределений этих переменных сравниваются между экспериментами URB и noURB для выявления роли городской застройки в повторяемости и интенсивности КОЯП.

Выявлены обусловленные влиянием города статистически значимые различия в распределении интенсивных осадков, вертикальной скорости ветра, а также параметра UH25. В эксперименте URB по сравнению с экспериментом noURB выявлена область повышенных значений этих переменных непосредственно над Москвой и к северо-востоку от города — в подветренной области (учитывая преобладание юго-западных ветров). Значительное влияние города также отмечено для повторяемости событий с одновременным наличием экстремальных осадков и экстремальных скоростей ветра.

Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 18-77-10076). Работа Варенцова М.И. и Ярынич Ю.И. дополнительно поддержана грантом Президента РФ (МК-5988.2021.1.5).

**Литература:**

1. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология, 2022, №5, С.27–41.
2. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia // Atmosphere, 2018. V. 9(2). P.50.

## **Система COSMO-Ru численного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: современное состояние и дальнейшее развитие**

Ривин Г.С.<sup>1,2</sup>, Розинкина И.А.<sup>1,2</sup>, Астахова Е.Д.<sup>1</sup>, Блинов Д.В.<sup>1</sup>, Бундель А.Ю.<sup>1</sup>, Варенцов М.И.<sup>1,2</sup>, Кирсанов А.А.<sup>1</sup>, Чубарова Н.Е.<sup>1,2</sup>, Самсонов Е.Т.<sup>1,2</sup>, Шатунова М.В.<sup>1</sup>, Алферов Д.Ю.<sup>1</sup>, Алферов Ю.В.<sup>1</sup>, Быков Ф.Л.<sup>1</sup>, Воробьева Е.В.<sup>1</sup>, Горлач И.А. и др.

<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[gdaly.rivin@mail.ru](mailto:gdaly.rivin@mail.ru)

**Ключевые слова:** негидростатическая бесшовная модель атмосферы, численный прогноз погоды, суперкомпьютерное моделирование

В настоящее время оперативная система COSMO-Ru работает на двух компьютерах Cray XC40-LC (США, пиковая скорость 1,3 Пфлопе) и T-Platforms V6000 (Россия, пиковая скорость 0,8 Пфлопе).

Для улучшения ее прогностических свойств с одной стороны в последние годы продолжались работы по (1) усовершенствованию анализа снежного покрова, (2) усвоению радарных данных на основе метода “nudging”, (3) исследованию свойств полярных циклонов и (4) созданию региональных ансамблевых прогнозов с разрешением конвекции.

С другой стороны, проводились работы по (5) нахождению начальных данных для глобальной конфигурации ICON-Ru модели ICON, (6) разработке региональных ансамблевых прогнозов с разрешением конвекции, (7) усовершенствованию радиационного блока, (7) улучшению задания информации об аэрозолях и исследованию применимости модели ICON для оперативных и исследовательских целей на существующих вычислительных возможностях Росгидромета.

В докладе предполагается обсудить изменения, которые произошли в системе COSMO-Ru, связанные с усовершенствованием конфигураций COSMO-Ru модели COSMO (ниже приведены примеры уже опубликованных работ по этой тематике), заменой этих конфигураций на конфигурации ICON-Ru модели ICON и результаты исследований, связанных с перспективой дальнейшего развития системы, основанной на применении конфигураций ICON-Ru.

### ***Литература:***

1. Revokatova A., Nikitin M., Rivin G., Rozinkina I., Nikitin A., Tatarinovich E. High-resolution simulation of polar lows over Norwegian and Barents seas by COSMO-CLM and ICON models for 2019–2020 cold season // Atmosphere, 2021, v 12, № 2.
2. Chubarova N., Vogel H., Androsova E., Kirsanov A., Popovicheva O., Vogel B., Rivin G.: Columnar and surface urban aerosol in Moscow megacity according to measurements and simulations with COSMO-ART model // Atmos. Chem. Phys., 2022, v 22, 10443–10466.

## **Исследование мультифрактальности температуры на "Михнево"**

Рябова С.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия*

[riabovasa@mail.ru](mailto:riabovasa@mail.ru)

**Ключевые слова:** мультифрактальность, MF-DFA, спектр сингулярности

Целью настоящего исследования является изучение свойств мультифрактальности временных рядов среднесуточной, максимальной и минимальной температуры воздуха, зарегистрированной на Геофизической обсерватории "Михнево" ИДГ РАН. Мультифрактальный метод анализа флуктуаций относительно тренда (MF-DFA) используется для изучения долгосрочной корреляции временных рядов и спектра сингулярности для оценки степени мультифрактальности.

## **Исследование взаимосвязей между температурой поверхности и теплосодержанием тропического Тихого океана по данным реанализа и климатических моделей (в контексте динамики явления Эль-Ниньо)**

Селезнев А.Ф.<sup>1,2</sup>, Мухин Д.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Научно-образовательный математический центр «Математика технологий будущего», Нижний Новгород, Россия  
[aseleznev@ipfran.ru](mailto:aseleznev@ipfran.ru)

**Ключевые слова:** Эль-Ниньо, анализ данных, теплосодержание океана, климатические модели

В работе проведено исследование пространственно-распределенных данных температуры поверхности (ТПО) и теплосодержания верхнего (0-300 м) слоя тропического Тихого океана (ТО) на предмет выявления взаимосвязей этих характеристик в контексте динамики явления Эль-Ниньо. По данным ТПО выявлен индекс, который описывает связанную с Эль-Ниньо изменчивость в центральной части Тихого океана и имеет высокую корреляцию с традиционным индексом NINO3.4. По данным ТО найден сигнал, который может характеризовать процессы накопления и разгрузки подповерхностных теплых вод в центральной и западной части Тихого океана, которые, согласно современным концепциям, являются ключевой составляющей динамики колебания Эль-Ниньо. Показано, что найденные индексы имеют четкий фазовый сдвиг относительно друг друга. При этом максимальные лаговые корреляции индексов достигаются при их относительном сдвиге по времени 5-9 месяцев. Установлено, что, в отличие от традиционных индексов Эль-Ниньо на основе ТПО, найденный индекс ТО характеризуется не весенним, а зимним барьером предсказуемости. Результаты, полученные по данным реанализа, сравниваются с результатами, полученными по выходным данным некоторых известных глобальных климатических моделей.

Работа выполнена в рамках Программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего», проект #075-02-2020-1483/1

## **Становится ли погода более нервной?**

Семенов В.А.

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

[vasemenov@ifaran.ru](mailto:vasemenov@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *изменения климата, экстремальные погодные явления*

В последние десятилетия на территории России отмечается рост экстремальных погодно-климатических аномалий, сопровождающиеся значительными негативными последствиями. Такой рост связывается с потеплением климата. Рост температуры, действительно, во многих случаях способствует увеличению частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений. В то же время, потепление может приводить и к снижению экстремальности погоды. В докладе рассмотрены современные тенденции изменения характеристик погодно-климатических аномалий на территории России, обсуждаются механизмы связи таких изменений с глобальным потеплением, анализируется ряд недавних значимых экстремальных погодных явлений.

## **Влияние изменений солнечной активности на Эль-Ниньо - Южное колебание и Антарктическое колебание как элементов Глобальной атмосферной осцилляции**

Серых И.В., Сонечкин Д.М.

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

[iserykh@gmail.com](mailto:iserykh@gmail.com)

**Ключевые слова:** Эль-Ниньо – Южное колебание, Антарктическое колебание, Южная кольцевая мода, Глобальная атмосферная осцилляция, 11-летнее изменение солнечной активности

В работе [1] показано, что Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) является элементом Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО). На ГАО оказывают влияние следующие внешние квазипериодические силы: годовой ход поступления тепла от Солнца, 14-месячное чандлеровское колебание полюсов Земли, 11-летнее изменение солнечной активности, 18.6-летняя лунно-солнечная нутация оси вращения Земли [2]. Из-за несоизмеримости периодов воздействия этих внешних сил есть основания полагать, что динамика ГАО является не хаотической, а может быть описана математической моделью Странного нехаотического аттрактора (СНА). Таким образом, динамика ГАО может быть прогнозируема статистическими методами с достаточно большой заблаговременностью. Благодаря этому и западно-восточному распространению пространственной структуры ГАО предложен индекс-предиктор ЭНЮК, позволяющий прогнозировать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья с годовой заблаговременностью [3]. Данная работа посвящена поиску ответа на вопрос: существует ли в межгодовой климатической изменчивости, ассоциированной с ГАО, только одна мода, которой является ЭНЮК, или же ГАО включает в себя и другие моды.

С помощью специально разработанной методики исследована межгодовая изменчивость полей аномалий атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) ассоциированная с ГАО. Показано, что исследуемая изменчивость содержит моду связанную с ЭНЮК и моду связанную с Антарктическим колебанием (ААК) – Южную кольцевую моду (ЮКМ). Обнаружено, что ГАО не включает в себя часть изменчивости ДУМ ассоциированную с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья центрально-тихоокеанского типа. С помощью кросс-вейвлетного анализа исследованы связи между индексами ЭНЮК и ЮКМ. Найдены отрицательные связи между этими индексами на периодах колебаний около 11 лет. Выдвинута гипотеза о влиянии синхронизации и рассинхронизации квази-11-летних изменений солнечной активности и ЭНЮК на ослабление и усиление отрицательных связей между ЭНЮК и ЮКМ на периодах колебаний около 11 лет.

### ***Литература:***

1. Serykh, I.V., Sonechkin D.M. El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the main mode of interannual climate variability // Atmosphere. 2021. 12. 1443.
2. Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // Theoretical and Applied Climatology. 2019. 137. 2639–2656.
3. Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // International Journal of Climatology. 2021. 41. 3781–3792.

## **Отклик динамики арктического стратосферного полярного вихря на крупномасштабные аномалии температуры поверхности Тихого океана в идеализированных модельных экспериментах**

Собаева Д.А.<sup>1,2</sup>, Зюляева Ю.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Россия  
[sobaeva.da@phystech.edu](mailto:sobaeva.da@phystech.edu)*

**Ключевые слова:** *стратосферный полярный вихрь, ЭНЮК, ТДК, численное моделирование*

Стратосфера обладает прогностическим потенциалом на субсезонном временном масштабе. Интенсивность стратосферного полярного вихря (иСПВ) позволяет оценить среднее положение основных шторм-треков Северного полушария на периоде 10–60 дней. Заблаговременность детерминистического прогноза иСПВ в настоящее время не превышает 2 недели, но на основе низкочастотных компонент климатической системы, например, крупномасштабных аномалий температуры поверхности океана (аТПО), таких как Эль-Ниньо Южное колебание (ЭНЮК) и Тихоокеанское десятилетнее колебание (ТДК), возможен вероятностный прогноз на более длительный период. Для качественной и количественной оценки механизмов формирования аномалий иСПВ под влиянием крупномасштабных аТПО Тихого океана в тропической зоне и в умеренных широтах были проведены идеализированные модельные эксперименты на платформе ISCA<sup>1</sup>. В расчетах аТПО, характеризующие моды ЭНЮК и ТДК были удвоены. Было показано, что аТПО, соответствующие фазам ТДК, не оказывают статистически значимого влияния на динамику СПВ, но значительно корректируют влияние мод ЭНЮК при добавлении к ним. Влияние явлений Эль-Ниньо (ЭН) и Ла-Нинья (ЛН), когда они происходят на фоне нулевых аТПО в центральной части Тихого океана в средних широтах, на иСПВ асимметрично, так в «чистом» ЭН эксперименте вихрь на 40% слабее относительно контрольных значений, а в «чистом» ЛН СПВ ослаблен не более чем на 20%. При этом, во время положительной фазы ТДК влияние ЭН усиливается и иСПВ уменьшается на 58% по сравнению с контрольными значениями. При отрицательной фазе ТДК эффект ЭН значительно ослабевает, а в марте аномалии статистически не различимы со среднеклиматическими значениями. Эффект ЛН ослабевает на фоне обеих фаз ТДК. Анализ крупномасштабной структуры поля давления средней тропосферы (500 гПа) показал, что ЭН приводит к усилению Тихоокеанского-северо-американского колебания, а в период ЛН пространственная структура аномалий давления соответствует усилению Арктической осцилляции.

### **Литература:**

1. Vallis G. K. et al. Isca, v1. 0: A framework for the global modelling of the atmospheres of Earth and other planets at varying levels of complexity //Geoscientific Model Development. – 2018. – Т. 11. – №. 3. – С. 843-859.

## **Процедуры оценки будущих выбросов и поглощения углекислого газа и метана водными объектами суши**

Степаненко В.М.<sup>1</sup>, Ломов В.А.<sup>1,2</sup>, Романенко В.А.<sup>1</sup>, Репина И.А.<sup>2,1</sup>, Горин С.Л.<sup>3,1,2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

[stepanen@srcc.msu.ru](mailto:stepanen@srcc.msu.ru)

**Ключевые слова:** парниковые газы, глобальный цикл углерода и метана, внутренние водоемы, модель деятельного слоя суши

Даётся краткий обзор имеющихся сведений о вкладе естественных и искусственных водных объектов суши в глобальный цикл углерода и метана. Даются основы построения математических моделей расчёта эмиссий  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  озёрами и водохранилищами, выбранные для применения в моделях Земной системы. Приводятся результаты моделей, сформулированы задачи будущих исследований. Представлена создаваемая в рамках национального проекта ВИПГЗ новая версия модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ с усовершенствованным представлением термодинамики и биогеохимии водоёмов и рек.

## **Лабораторное моделирование общей циркуляции атмосферы**

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю., Попова Е.Н.  
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия  
[san@icmm.ru](mailto:san@icmm.ru)

**Ключевые слова:** лабораторное моделирование; глобальная циркуляция атмосферы; вращающаяся конвекция

Лабораторные аналоги атмосферных течений позволяют на основе хорошо воспроизводимых экспериментов изучать фундаментальные основы сложных динамических процессов [1]. Основным подходом для лабораторного моделирования атмосферной циркуляции в средних широтах является конвекция во вращающемся цилиндрическом зазоре с изотермическими стенками, теплоизолированным дном и твердой или свободной верхней поверхностью [1]. Данная система позволяет воспроизвести крупномасштабную циркуляцию и течения, возникающие из-за бароклининой неустойчивости, которые осуществляют транспорт тепла от экватора к полюсу, однако имеет ряд ограничений. Попытка уйти от основных ограничений модели [1] была предпринята в работе [2], в которой источник тепла располагался на периферии дна, а холодильник в виде диска был расположен в верхней части центральной области цилиндрического зазора. В эксперименте производились измерения температуры и качественные наблюдения за течением жидкости. Было показано, что конвекция в предложенной лабораторной модели носит более сложный, чем в [1] пространственный характер, характеризуется суперпозицией и взаимодействием свободной конвекции и бароклининых волн. Еще одним важным фактором является геометрия слоя. В моделях [1] и [2] аспектное отношение  $\Gamma$  (ширина цилиндрического зазора к высоте слоя) было равно 1 и 1.5 соответственно. В данной работе представлены первые результаты лабораторного моделирования общей циркуляции атмосферы в постановке близкой к [5], но для значительно большего значения аспектного отношения  $\Gamma=11.5$ .

Исследования проведенные при помощи новой лабораторной модели показали, что она воспроизводит основные черты глобальной атмосферной циркуляции, а именно антициклоническое течение на малых широтах, циклоническую циркуляцию в области средних и полярных широт, формирование крупномасштабных бароклининых вихрей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-21-00572.

### **Литература:**

1. Read, P.L., Edgar P. Pérez, Irene M. Moroz, and Roland M. B. Young . General Circulation of Planetary Atmospheres: Insights from Rotating Annulus and Related Experiments // Modeling Atmospheric and Oceanic Flows: Insights from Laboratory Experiments and Numerical Simulations, American Geophysical Union, 2014, 368p.
2. Sclan H., Read P. L. A rotating annulus driven by localized convective forcing: a new atmosphere-like experiment // Exp.Fluids. – 2017. – Т. 58. – №. 6. – С. 75.

## Оценка качества сезонных хиндкастов модели климата INMCM5, инициализированных анализом океана Гидрометцентра России

Тарасевич М.А.<sup>1,2,3,4</sup>, Володин Е.М.<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>3</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

[mashatarasevich@gmail.com](mailto:mashatarasevich@gmail.com)

**Ключевые слова:** сезонные хиндкасты, анализ океана GODAS HMC, модель климата INMCM5, коэффициент корреляции аномалий

В данном исследовании производится оценка качества сезонных хиндкастов современной версии климатической модели ИВМ РАН, инициализированных анализом океана Гидрометцентра России. Для построения начальных состояний используются ежедневные данные реанализа ERA5 [1] для атмосферы и деятельного слоя суши и анализа HMC GODAS [2] для океана. С подготовленных начальных данных выполнено две серии хиндкастов: на зимние (ноябрь–февраль 2007/2008–2015/2016 гг) и летние (июнь–август 2007–2015 гг). Размер ансамбля для обеих серий одинаков и составляет 20 членов.

Для верификации результатов двух серий хиндкастов INMCM5 используются пространственное распределение и глобально осреднённое значение коэффициента временной корреляции аномалий для давления на уровне моря и приземной температуры воздуха. В качестве наблюдений используются данные реанализа ERA5. Коэффициенты корреляции вычисляются по средним значениям за декабрь–февраль 2007/2008–2015/2016 гг и июнь–август 2007–2015 гг. Перед вычислением коэффициентов корреляции данные модели климата ИВМ РАН и реанализа ERA5 интерполируются на регулярную широтно-долготную сетку  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , принятую WMO для верификации долгосрочных прогнозов. Для сравнения используются хиндкасты INMCM5, инициализированные среднемесячными данными реанализов океана SODA3.4.2 и ORAS5, а также результаты прогностической системы GloSea6 Метеорологической службы Великобритании.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 20-17-00190). Расчёт хиндкастов INMCM5 выполнен на 1440 ядрах вычислительной системы Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Гидрометцентра России.

### Литература:

1. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, V. 146, N. 730, pp. 1999–2049.
2. Зеленько А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана, Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 2016, Т. 52, № 4, С. 501–513.

## **Повторяемость зимних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций**

Тимажев А.В.<sup>1</sup>, Мохов И.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[timazhev@ifaran.ru](mailto:timazhev@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** зимние атмосферные блокирования, ERA-Interim, явления Эль-Ниньо, Атлантическая мультидесятилетняя осцилляция, Тихоокеанская десятилетняя осцилляция

Получены оценки региональных аномалий повторяемости зимних атмосферных блокирований в Северном полушарии, диагностированных аналогично [1-2] по данным реанализа ERA-Interim для периода 1979–2018 гг. при разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций. В том числе получены количественные оценки региональной повторяемости зимних блокирований при явлениях Эль-Ниньо разного типа, характеризующихся, в частности, индексами Niño3 и Niño4.

При нейтральной фазе явлений Эль-Ниньо в положительной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции отмечено значимое превышение средних значений повторяемости зимних атмосферных блокирований для 40-летнего периода над европейскими регионами. В фазе Эль-Ниньо отмечено существенное увеличение повторяемости атмосферных блокирований в отрицательной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции, а также в положительной фазе Атлантической мультидесятилетней осцилляции, в частности над Тихим океаном. В фазе Ла-Нинья при использовании индекса Niño4 выявлено значительное увеличение повторяемости атмосферных блокирований зимой в области Уральских гор в положительной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции и отрицательной фазе Атлантической мультидесятилетней осцилляции.

### **Литература:**

1. Wiedenmann J.M., Lupo A.R., Mokhov I.I., Tikhonova E.V. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic // J. Climate. 2002. V.15. P.3459-3473.
2. Lupo A.R., Jensen A.D., Mokhov I.I., Timazhev A., Eichler T., Efe B. Changes in global blocking character during recent decades // Atmosphere. 2019. V. 10. No. 2. P. 92.  
<https://doi.org/10.3390/atmos10020092>

## Развитие системы среднесрочного и долгосрочного прогноза на основе модели ПЛАВ

Толстых М.А.<sup>1,2</sup>, Фадеев Р.Ю.<sup>1,2</sup>, Шашкин В.В.<sup>1,2</sup>, Травова С.В.<sup>2</sup>, Зарипов Р.Б.<sup>2</sup>, Гойман Г.С.<sup>1</sup>, Алипова К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

[mtolstykh@mail.ru](mailto:mtolstykh@mail.ru)

**Ключевые слова:** численный прогноз погоды, модель общей циркуляции атмосферы, среднесрочный прогноз погоды, долгосрочный прогноз погоды

В последние годы бесшовная система прогноза на основе модели атмосферы ПЛАВ [1], разработанная в ИВМ РАН и Гидрометцентре России, получила развитие как в области вычислительных алгоритмов и их реализации, так и в области описания процессов подсеточного масштаба [2]. На этой основе разработаны три новые конфигурации системы прогноза.

1. Начала оперативные испытания новая версия модели ПЛАВ10 для среднесрочного прогноза, имеющая горизонтальное разрешение около 10 км в Северном полушарии, 104 уровня по вертикали, что соответствует сегодняшнему среднему мировому уровню.

2. Испытана и внедрена новая система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды. Детали этой работы будут представлены в отдельном докладе на конференции.

3. Разработана и с начала 2022 года испытывается новая система субсезонных и сезонных прогнозов в Гидрометцентре России. Система включает генератор начального ансамбля на основе LETKF и модель ПЛАВ с горизонтальным разрешением 0,9x0,72 градуса, 96 уровней по вертикали. Модель включает представление ее неопределенности с использованием методик SPP. Упрощенный расширенный фильтр Калмана используется для инициализации многослойной модели почвы ИВМ РАН – МГУ [3].

Будут представлены некоторые работы по новым версиям модели ПЛАВ для среднесрочного и долгосрочного прогноза. В том числе, будут показаны результаты модельной климатологии, полученной по ансамблевым историческим сезонным прогнозам за 1991-2015 годы для различных сезонов года. Модель воспроизводит стратосферное квазидвухлетнее колебание и колебание Мэддена-Джулиана.

Исследования по предсказуемости атмосферной циркуляции на субсезонном и сезонном масштабе выполнены в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>.

### Литература:

1. Толстых М.А. [и др.] Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. 2017. М.: Триада лтд.-166 с.
2. Fadeev R.Yu. [et al] Glacier parameterization in SLAV numerical weather prediction model//Rus. J. Num. An. Math. Mod. 2022 V37 N4, P.189-201
3. Травова С.В [и др] Усвоение данных приземных наблюдений для анализа влажности почвы многослойной модели деятельного слоя суши ИВМ РАН–МГУ в составе глобальной системы моделирования атмосферы ПЛАВ//Метеорология и гидрология 2022 N8. С.80-100.

## **О некоторых усовершенствованиях в глобальной модели атмосферы ПЛАВ**

Фадеев Р.Ю.<sup>1,2</sup>, Толстых М.А.<sup>1,2</sup>, Шашкин В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

[rost.fadeev@gmail.com](mailto:rost.fadeev@gmail.com)

**Ключевые слова:** атмосфера, долгосрочный прогноз погоды, глобальная модель, климат

В докладе обсуждаются особенности настройки и усовершенствования некоторых параметризаций глобальной модели ПЛАВ [1,2], которые позволили существенно уменьшить систематические ошибки воспроизведения осредненных характеристик атмосферы Земли. Особое внимание уделяется новым подходам к параметризованному описанию подстилающей поверхности и технологии расчёта тепловлагообмена с нижней тропосферой. Выводы о статистической значимости влияния рассматриваемых изменений на точность воспроизведения атмосферной циркуляции сделаны на основе анализа качества ретроспективных долгосрочных прогнозов с заблаговременностью до четырех месяцев (для разных сезонов), а также на основе исследования осредненных характеристик модельной атмосферы в сравнении с реанализом ERA5.

Представленные в докладе работы выполнены в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда (№ 21-17-00254, <https://rscf.ru/project/21-17-00254/>).

### **Литература:**

1. Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., et al. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model - Russ. Meteor. and Hydrol., 2015, V. 40, pp. 374-382.
2. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Climate version of the global atmospheric model SL-AV: development and preliminary results - Russ. Meteor. and Hydrol., 2019, V. 1, pp. 22-35.

## **Выделение мод вынужденной и собственной изменчивости в климатических моделях по ансамблю реализаций**

Фейгин А.М.<sup>1,2</sup>, Гаврилов А.С.<sup>1,2</sup>, Кравцов С.В.<sup>1,3,4</sup>, Буянова М.Н.<sup>1</sup>, Мухин Д.Н.<sup>1,2</sup>, Лоскутов Е.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Научно-образовательный математический центр «Математика технологий будущего»,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Университет Висконсина-Милуоки, Милуоки, Висконсин, США

<sup>4</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
[feigin@ipfran.ru](mailto:feigin@ipfran.ru)

**Ключевые слова:** климатическая система, вынужденный отклик, моды собственной изменчивости

Климатическая система Земли является открытой динамической системой, подверженной различным внешним воздействиям на различных временных масштабах. Актуальность задачи идентификации вынужденного отклика и мод собственной изменчивости в этой системе не вызывает сомнений. В данной работе предлагается новый метод для решения данной задачи применительно к глобальным климатическим моделям на основе анализа генерируемых ими ансамблей реализаций. На простом концептуальном модельном примере показывается, что метод работает не хуже существующих ансамблевых методов выделения вынужденного отклика даже в случае присутствия медленной собственной изменчивости, зачастую мешающей выделению отклика в условиях достаточно короткого анализируемого временного интервала. Демонстрируется работа метода на примере данных одной из глобальных климатических моделей, для которой имеется достаточно большой ансамбль реализаций. Обсуждается применимость метода к данным других глобальных климатических моделей. Работа выполнена при поддержке Программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Математика технологий будущего» (проект 075-02-2020-1483/1).

## **Мониторинг атмосферы с помощью ГНСС приемников и конвективные процессы**

Хуторова О.Г., Маслова М.В., Хуторов В.Е., Корчагин Г.Е.  
Казанский федеральный университет, Казань, Россия  
[maryamaslova1861@mail.ru](mailto:maryamaslova1861@mail.ru)

**Ключевые слова:** ГНСС, атмосферная конвекция

Мезомасштабные конвективные явления часто связаны с возникновением сильных ливней, гроз и шквалов, приводящих к серьезным последствиям. Мониторинг и точный прогноз мезомасштабных конвективных явлений представляет собой чрезвычайно сложную задачу, для решения которой необходимо учитывать максимально полную информацию о наблюдаемом состоянии атмосферы и его ожидаемых изменениях.

В настоящее время очень большое внимание уделяется связи радиосигналов систем ГЛОНАСС и GPS с параметрами тропосферы. Для мониторинга атмосферных процессов широко используется всепогодная технология с высоким временным и пространственным разрешением - зондирование тропосферы с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1]. В основе дистанционного зондирования лежит оценка зенитной тропосферной задержки (ZTD) электромагнитных волн, излучаемых спутником. Интегральное влагосодержание атмосферы (IWV) восстанавливается из тропосферной задержки радиоволн, преобразование учитывает температуру, измеряемую на поверхности Земли [1].

В исследовании ставится цель выявления закономерностей связи измеряемых с помощью ГНСС приемников параметров атмосферы с характеристиками конвективных процессов. В работе были построены ряды ZTD и интегрального влагосодержания атмосферы, рассчитанные по наблюдениям ГНСС-приемника в г. Казань за 2009-2021 гг. Использованы данные реанализа ERA5 о количестве осадков, доступной потенциальной энергии неустойчивости, энергии противодействия конвекции [2].

### **Литература:**

1. Bevis M., S. Businger, T. A. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. 1992. - V. 97, N. D14. - P. 15787-15801.
2. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present: [Electronic resource]. - URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

## Модификация и верификация блока описания снежного покрова климатической модели ИВМ РАН

Черненко А.Ю.<sup>1,2</sup>, Володин Е.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Россия  
[chernenkoval97@gmail.com](mailto:chernenkoval97@gmail.com)

**Ключевые слова:** климат, климатическая модель, модель снега, перезамерзание снега

При моделировании климата важно правильно описывать снежный покров, так как он играет одну из ключевых ролей в гидрологическом цикле, а также оказывает влияние на радиационный баланс на поверхности. Данная работа посвящена обновленному блоку описания снега климатической модели ИВМ РАН (за основу была взята версия модели INM-CM-48 [1]).

В обновленной версии блока, описывающего снежный покров, предполагается, что слой снега может включать 4 фракции: лежалый и свежеснежавший снег, жидкую воду, задержанную снежными порами, а также грубый перезамерзший снег, образовавшийся из этой воды. Количество снега (SWE) определяется следующим балансовым уравнением:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = P - M + \Delta S_{wat} + \Delta S_{rfz} - \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{L} \cdot \rho_w}$$

Здесь учтены твердые осадки, сток избыточной талой воды в почву, жидкая вода, задержанная снежными порами, перезамерзший снег, а также испарение. Средняя плотность снежного слоя вычисляется как среднее взвешенное по составным фракциям.

Для верификации модели снега и ее модифицированной версии была проведена серия вычислительных экспериментов, аналогичных экспериментам проекта ESM-SnowMIP [2]. Были проведены модельные расчеты для 10 метеостанций, находящихся в различных регионах, на срок от 7 до 20 лет. На вход модели подавалась информация об атмосферных форсингах (температура, давление, влажность, осадки, радиация, ветер), а на выходе данные о снежном покрове и почве сравнивались с наблюдениями с этих станций. Расчеты показали, что исходная и модифицированная версии модели корректно воспроизводят метрики снежного покрова. Однако, новая модель показывает лучшее согласие с данными наблюдений, что особенно заметно в весенние месяцы.

Заметим, что в данном исследовании рассматривался снежный покров только на суше, однако, полученные результаты можно использовать и в случае морского льда.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ №20-17-00190).

### Литература:

1. Volodin E., Mortikov E., Kostyrykin S., Galin V., Lykossov V., Gritsun A., Diansky N., Gusev A., Iakovlev N., Shestakova A., Emelina S. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russ. J.Num.An.Math.Mod. 2018, v.33, No.6, p.367-374.
2. Krinner G. et al. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks // Geosci. Model Dev., 2018, 11, 5027–5049.

## **Наблюдаемые изменения опасных атмосферных явлений конвективного характера в России**

Чернокульский А.В.

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

[a.chernokulsky@ifaran.ru](mailto:a.chernokulsky@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *сильные ливневые осадки, град, шквал, смерч, высота конвективных облаков, индексы конвективной неустойчивости, данные наблюдений, спутниковые данные, реанализ, Россия, изменение климата*

В докладе представлен анализ изменений повторяемости и интенсивности конвективных опасных явлений погоды (КОЯП), включая сильные ливни, грозы, град, шквалы и смерчи в регионах России в теплый период года на основе различных независимых источников информации [1]. На основе данных наблюдений на российских метеорологических станциях за период 1966–2020 гг. оценена повторяемость гроз, града и сильного ветра, вклад экстремальных ливневых осадков в общую сумму осадков, а также доля небосвода, закрытая кучево-дождевыми облаками. На основе спутниковых данных оценена повторяемость и интенсивность смерчевых и шкваловых событий, вызвавших ветровалы (за 1986–2021 гг.), и высота верхней границы облаков глубокой конвекции (за 2002–2021 гг.). На основе данных реанализа ERA5 оценена повторяемость условий, характерных для развития умеренных и интенсивных КОЯП. Результаты анализа указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской территории России. Повторяемость умеренных КОЯП имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных — к росту. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке планов адаптации российских регионов и отраслей к изменению климата.

### ***Литература:***

1. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология, 2022, №5, С.27–41. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.

## **Ветровалы в лесной зоне Сибири в 2001-2022 гг. и вызывающие их метеорологические явления**

Чернокульский А.В.<sup>1,2</sup>, Шихов А.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия  
[and3131@inbox.ru](mailto:and3131@inbox.ru)

**Ключевые слова:** ветровалы, шквалы, смерчи

Рассматривается пространственно-временное распределение ветровалов в лесной зоне Западной и Центральной Сибири за период с 2001 г. по н.в. Данные о ветровалах получены по спутниковым снимкам Landsat, Sentinel-2, данным проекта Global Forest Change и снимкам высокого пространственного разрешения с открытых картографических сервисов. Для уточнения дат и времени штормовых событий использованы данные сети метеостанций, снимки с метеорологических спутников и сведения об опасных явлениях погоды, наблюдавшихся в данном регионе.

Созданная база данных включает 597 ветровалов на общей площади 124,6 тыс. га. Общая площадь ветровалов в Сибири составляет 124,7 тыс. га, что в пересчете на лесопокрытую площадь существенно меньше, чем на европейской территории России (ЕТР). Так, в Западной Сибири ветровалы занимают 0,04% от лесопокрытой площади, что в 4 раза меньше, чем на ЕТР за аналогичный период. Крупнейшие из известных ветровалов в Сибири наблюдались в 2020-2022 гг. За счет этих событий, на последние три года приходится свыше 44% от всей известной площади ветровалов в Сибири.

Около 60% ветровалов, включенных в базу данных, вызваны смерчами, но на них приходится всего 16,8% общей площади. В Западной Сибири вклад смерчевых ветровалов достигает 67% по числу случаев и 25% по площади потерь лесов (что значительно больше, чем на ЕТР). На шкваловые ветровалы приходится 38% случаев и 68,8% от общей площади. Вклад неконвективных явлений составляет менее 2% от числа случаев, но свыше 14% от общей площади сплошных ветровалов, что существенно больше, чем на ЕТР. Максимальная плотность ветровалов отмечается в Красноярском крае южнее г. Красноярска, где этому способствует широкое распространение перестойных хвойных насаждений. Роль ветровалов как фактора нарушения лесного покрова в Сибири незначительна в сравнении с лесными пожарами. В Западной Сибири площадь ветровалов в 77,5 раза меньше площади гарей за этот же период, тогда как для ЕТР это соотношение составляет 3,5/1.

**Эмпирические зависимости между характеристиками  
конвективных штормов, вызывающих смерчи и шквалы,  
сигнатурами на верхней границе облаков и конвективными  
параметрами в Северной Евразии**

Чернокульский А.В.<sup>1,2</sup>, Шихов А.Н.<sup>3</sup>, Ярынич Ю.И.<sup>1,4,5</sup>, Спрыгин А.А.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>4</sup>Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>5</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>6</sup>Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия

[and3131@inbox.ru](mailto:and3131@inbox.ru)

**Ключевые слова:** шквалы, смерчи, спутниковые снимки *Meteosat*, конвективные шторма, сигнатуры, конвективная неустойчивость, сдвиг ветра

Выполнен совместный анализ информации о случаях шквалов и смерчей, выявленных по данным о ветровалах в лесной зоне Северной Евразии, характеристик конвективных штормов, вызвавших эти события (с акцентом на структуру их верхней части облаков), и данных о конвективных параметрах, полученных на основе реанализа ERA5. Выборка включает 137 случаев смерчей и 133 случая шквалов, связанных со 120 различными конвективными облачными системами (конвективными штормами), за период 2006-2021 гг.

Большинство случаев шквалов и смерчей связаны с прохождением суперячейковых облаков или квазилинейных конвективных систем. Большинство из них были долгоживущими (средняя продолжительность жизни 9,5 ч). Температура верхней границы облаков (ВГО) в случаях со шквалами статистически значимо ниже, чем в случаях со смерчами ( $-63^{\circ}\text{C}$  и  $-61^{\circ}\text{C}$  соответственно). В 54% случаев со смерчами и в 68% случаев со шквалами наблюдались сигнатуры интенсивных восходящих потоков на верхней границе облаков – пробои тропопаузы (ОТ), кольцевые или U-V образные структуры. Доля случаев с сигнатурами возрастает для долгоживущих штормов, тогда как короткоживущие ячейки масштаба мезо-β сопровождалась возникновением сигнатур всего в 21% случаев.

Суперячейки формируются при существенно более низких значениях энергии неустойчивости (CAPE), влагосодержания атмосферы (PW) и уровня конденсации (LCL), в сравнении с другими типами штормов. Для формирования суперячеек большее значение имеет сдвиг ветра. В свою очередь, сигнатуры восходящих потоков (ОТ, кольцевые или U-V образные структуры) чаще наблюдались при более высоких значениях CAPE, PW и композитных параметров. Минимальная температура ВГО имеет сильную отрицательную корреляцию с CAPE, PW и рядом композитных параметров, поскольку они характеризуют интенсивность восходящих потоков. Для продолжительности жизни штормов выявлена статистически значимая зависимость со значениями параметра WMAXSHEAR.

## Перспективная глобальная модель динамики атмосферы

Шашкин В.В.<sup>1,2,3</sup>, Гойман Г.С.<sup>1,3,2</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Россия

[vvshashkin@gmail.com](mailto:vvshashkin@gmail.com)

**Ключевые слова:** математическая модель, атмосферы, численные методы

Один из главных способов повысить достоверность математического моделирования атмосферы в задачах прогноза погоды и в климатических приложениях – использование более подробных сеток. При повышении пространственного разрешения модели атмосферы часть явлений, которые можно было учесть только в усредненном виде с помощью параметризации подсеточных процессов, начинают явно разрешаться на сетке. Лучше воспроизводятся нелинейные взаимодействия между движениями разных пространственных масштабов, каскады двумерной турбулентности.

В настоящее время характерное разрешение сеток моделей атмосферы по горизонтали – 7-10 км в прогнозе погоды, около 100 км в климате. Дальнейшее повышение разрешения требует пересмотра математических методов, применяемых для моделирования. Необходимо использовать сетку с квазиравномерным разрешением на сфере и отказаться от методов, использующих глобальные пересылки данных (например, разложение Фурье). Дальнейшее повышение разрешения фактически требует создания принципиально новых блоков решения системы уравнений гидротермодинамики атмосферы (динамических блоков).

В ИВМ РАН и Гидрометцентре России ведется разработка динамического блока нового поколения на сетке кубическая сфера. При разработке планируется достичь следующих целей:

- 1) Гибкость выбора численных методов и даже решаемой системы уравнений, для достижения универсальности блока по отношению к типу задач (погода/климат);
- 2) Возможность включения регионов повышенного разрешения в модель в рамках одного программного комплекса;
- 3) Высокая параллельная и вычислительная эффективность.

В настоящее время, в рамках проекта выполнены исследования горизонтальных дискретизаций на основе двумерного прототипа, испытывается трехмерная негидростатическая версия блока. Ведется разработка гидростатической версии и реализация методов интегрирования по времени с неявностью для вертикальных слагаемых в негидростатической версии. Представлены результаты численных экспериментов в идеализированной атмосфере.

Работа выполнена в ИВМ РАН им. Г.И. Марчука при поддержке гранта Российского научного фонда №21-71-30023.

## **Колебательная система климата, антропогенные и природные изменения в климатической системе**

Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б.

*Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации - Мировой центр данных*  
[boris\\_sher@mail.ru](mailto:boris_sher@mail.ru)

**Ключевые слова:** *изменения климата, колебания, резонансы, солнечная система, солнечная активность*

Выполнен анализ статистических связей изменений климата океана и атмосферы с изменениями в космосе.

Отмечено, что энергия воздействия космических факторов на климатическую систему очень мала по сравнению с наблюдаемыми изменениями климата, но климатическая система – это колебательная система, которая может откликаться на повторяющиеся циклические воздействия космических факторов по закону взаимодействия колебательных систем через механизм резонансов на соизмеримых частотах. Многократные повторяющиеся даже очень слабые, но резонансные воздействия раскачивают колебательную систему на её собственных частотах до колебаний с заметной амплитудой. В нелинейной колебательной системе резонансы способны вызвать изменения, по своей энергии многократно превосходящие приток энергии от внешнего фактора. В моменты наступления резонанса колебания могут усиливаться за счёт высвобождения внутренней энергии системы.

Большой океанический конвейер Брокера рассматривается как первое звено в передаче возмущений из космоса в климатическую систему. Термодинамическая инерционность трехмерного Мирового океана создает многолетнюю задержку отклика изменений температуры его поверхности на внешние воздействия. Этим объясняются слабые синхронные космико-земные связи и необходимость поиска асинхронных связей колебаний климата с космическими индексами.

Показаны высокие асинхронные корреляции многолетних колебаний температуры поверхности океана на основных океанических течениях Северного и Южного полушарий с параметрами циклических космических воздействий. Время запаздывания реакции температуры поверхности океана на внешние воздействия составило около 30-40 лет в разных частях Мирового океана. В изменениях климата океан является ведущим, а атмосфера ведомой.

## **Крупномасштабная циркуляция атмосферы над Азией в периоды формирования экстремально высокой приземной концентрации озона в Западной Сибири**

Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К.,

Толмачев Г.Н., Фофонов А.В.

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

[olgayumarchenko@gmail.com](mailto:olgayumarchenko@gmail.com)

**Ключевые слова:** *тропосферный озон, фотохимическое образование, циркуляция атмосферы*

В работе исследуются режимы циркуляции атмосферы, способствующие формированию экстремально высоких концентраций озона. В работе исследуются данные о концентрации озона, полученные на TOR станции, расположенной в Академгородке г. Томска. В качестве порога мы исследовали события 95-го перцентиля (O395). Для событий каждого месяца на основе данных реанализа были получены композиты в нижней и средней тропосфере, характеризующие температурный режим и особенности циркуляции. В результате получено, что для событий O395 характерны схожие циркуляционные условия для каждого месяца. Циркуляция характеризуется наличием области положительных аномалий геопотенциала между Западной и Восточной Сибирью, ассоциированная с теплыми воздушными массами. С востока и запада от этой области локализованы области отрицательных аномалий геопотенциала, ассоциированные с полярными воздушными массами. Район измерения озона во все месяцы оказывается либо в центре, либо на западной периферии положительной аномалии геопотенциала. При этом в приземной слое тропосферы отмечаются положительные аномалии температуры воздуха, а также усиление ветра с юго-запада. Обнаруженный циркуляционный режим представляет собой один из вариантов экстремального развития меридиональных процессов и влияет на увеличение концентраций озона за счет: трансграничного переноса воздушных масс из юго-западных районов, усиление скорости фотохимических реакций, а также добавление дополнительного источника примесей за счет возникновения природных пожаров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-05-50024 “Микромир” Микрочастицы в атмосфере: образование и трансформация в приземном слое воздуха и свободной тропосфере, радиационные эффекты и влияние на здоровье населения. Измерение концентрации озона выполняется в рамках госзадания ИОА СО РАН

## **Особенности распределения метана над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 года**

Антохина О.Ю.<sup>1</sup>, Антохин П.Н.<sup>1</sup>, Аршинова В.Г.<sup>1</sup>, Аршинов М.Ю.<sup>1</sup>, Белан Б.Д.<sup>1</sup>, Белан С.Б.<sup>1</sup>,  
Гурулева Е.В.<sup>1</sup>, Давыдов Д.К.<sup>1</sup>, Ивлев Г.А.<sup>1</sup>, Козлов А.В.<sup>1</sup>, Law K.<sup>2</sup>, Рассказчикова Т.М.<sup>1</sup>, Paris J.-D.<sup>3</sup>,  
Савкин Д.Е.<sup>1</sup>, Симоненков Д.В.<sup>1</sup>, Складнева Т.К.<sup>1</sup>, Толмачев Г.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, LATMOS, Paris, France*

<sup>3</sup>*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPS, CNRS-CEA-UVSQ, Orme des  
Merisiers, CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, France*

[bbd@iao.ru](mailto:bbd@iao.ru)

**Ключевые слова:** атмосфера, Арктика, вертикальное распределение, воздух, метан

Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного состава воздуха над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 года на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» был проведен эксперимент по зондированию атмосферы и водной поверхности над акваториями всех морей Северного Ледовитого океана в Российском секторе Арктики: Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского.

Анализ вертикального распределения над всеми Арктическими морями показал, что максимальные концентрации метана в период эксперимента наблюдались в приземном или приземном слое воздуха. На отдельных профилях имеются вторичные максимумы в нижней части пограничного слоя атмосферы. Перепад концентраций между уровнем 200 метров и свободной тропосферой достигал 180 млрд-1 над Карским морем и уменьшался над Восточно - Сибирским, Чукотским и Беринговым морями до 84, 85 и 83 млрд-1, соответственно. Сопоставление содержания метана над всеми морями показало, что наибольшая концентрация метана на высоте 200 метров была над Карским морем, наименьшая – над Чукотским. Незначительно отличались от Чукотского по его содержанию акватории Восточно- Сибирского и Берингова морей. Баренцево и море Лаптевых занимают промежуточное положение. Такое различие в распределении метана в этом регионе свидетельствует о том, что в Карском море, вероятно, имеется источник CH<sub>4</sub>, который мощнее остальных. При этом перепад концентраций мало зависит от высоты пограничного слоя, температуры воды и воздуха.

Зондирование атмосферы выполнено на УНУ самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик». Обработка данных и анализ результатов проведено по проекту Минобрнауки РФ № 075-15-2021-934.

## Экспериментальные исследования аэрозоля в Крыму весной 2020 г

Артамонова М.С.<sup>1</sup>, Лапченко В.А.<sup>2</sup>, Максименков Л.О.<sup>1</sup>, Чхетиани О.Г.<sup>1</sup>, Иорданский М.А.

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского — природный заповедник РАН филиал  
Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Феодосия, Россия  
[artamonova@ifaran.ru](mailto:artamonova@ifaran.ru)

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

Представлены результаты экспериментальных исследований счетной и массовой концентрации, дисперсного и элементного состава аэрозоля в приземном слое атмосферы на станции фоновое экологического мониторинга (СФЭМ) КНС – ПЗ РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ, расположенной в Карадагском заповеднике на юго-востоке Горного Крыма. Работы проводились с 22 марта по 18 июня 2020 г.

Для измерения счетной концентрации использовались 9 каналные аэрозольные счетчики лазерный и оптико-электрический с общим диапазоном каналов 0.15-5 мкм, разработанные в НИФХИ им. Л.Я. Карпова. Отбор проб аэрозоля для определения элементного состава и массовой концентрации осуществлялся при помощи суточной прокачки на фильтры АФА-ХА -20. Всего отобрано 86 аэрозольных проб.

Массовая концентрация аэрозоля по взвешенным фильтрам варьировалась от 3 до 35 мкг/м<sup>3</sup>. Исключение составили высокие концентрации частиц аэрозоля во время эпизода мощного восточного переноса аэрозоля с Арала через Калмыкию в Крым 25-27 марта 2020 г. В эти дни массовая концентрация изменялась от 50 до 195 мкг/м<sup>3</sup>.

Для определения элементного состава приземного аэрозоля на СФЭМ было выделено 30 проб. Выбор проводился на основании предварительно анализа обратных траекторий прихода воздушной массы в точку измерений, проведенного по открытому ресурсу NOAA HYSPLIT, для рассмотрения различных направлений прихода аэрозоля в точку наблюдений. Анализ элементного состава аэрозольных частиц, содержащихся в пробах на фильтрах АФА ХА-20, осуществлялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Проведена оценка аккумуляции химических элементов в почве и аэрозольных частицах, рассчитаны кларки концентрации, коэффициенты аэрозольной концентрации и коэффициенты обогащения химических элементов в почве и аэрозолях. Рассмотрены вопросы зависимости массовой концентрации, дисперсного и элементного состава приземного аэрозоля от дальней аэрозольной миграции и направления ветра.

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

**Возможности многоканальных оптических зондов  
обратного рассеяния для баллонных исследований  
аэрозольного состава средней атмосферы**

*Балугин Н.В., Фомин Б.А., Юшков В.А.*

*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область  
[horst2007@yandex.ru](mailto:horst2007@yandex.ru)*

**Ключевые слова:** *аэрозоль, обратное рассеяние, тропосферный аэрозоль, стратосферный аэрозоль, баллонное зондирование, оптические параметры*

Аэрозольные зонды обратного рассеяния применяются в ночное время для изучения и мониторинга полярных стратосферных облаков, тропосферного и стратосферного аэрозоля, перистых облаков, пироконвекции, вулканического аэрозоля, а также для верификации дистанционных методов и средств аэрозольных наблюдений наземного и спутникового базирования. Обычно используется двухволновая методика измерений, позволяющая диагностировать по цветовому индексу изменения в составе аэрозоля. В простых случаях, когда доминирует аэрозоль одного типа, в принципе идентифицируется и тип аэрозоля. Но в случае смеси аэрозолей, для определения её состава, одного цветового индекса очевидно недостаточно. Поэтому в докладе рассматривается применение 3-х и более, волновых методик. Приводятся данные зондовых измерений с использованием длин волн 470, 528, 850 и 948 нм, выполненных в 2021 и 2022 годах. Также приводятся результаты моделирования измерений с использованием других длин волн.

### **Аэрозольный слой в нижней термосфере**

Беляев А.Н.<sup>1</sup>, Николайшвили С.Ш.<sup>1</sup>, Омельченко А.Н.<sup>1</sup>, Полуаршинов М.А.<sup>2</sup>, Платов Ю.В.<sup>4</sup>,  
Смирнов Ю.В.<sup>2</sup>, Страхов А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова, Росгидромет, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*ПАО «РКК «Энергия» им. С.П.Королева, Королёв, Россия*

<sup>3</sup>*Научно производственное предприятие «Робис», Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова,*

*Троицк, Россия*

[anb52@mail.ru](mailto:anb52@mail.ru)

**Ключевые слова:** термосфера, аэрозольный слой

В ходе космического эксперимента (КЭ) «Терминатор» с борта Международной космической станции (МКС) на высоте ~100 км была зарегистрирована слоистая структура, ранее не наблюдавшаяся ни с поверхности Земли, ни с околоземных орбит. Наблюдения проводились в видимом (540 нм) и ближнем инфракрасном (700 нм и 830 нм) диапазонах спектра. Приводится описание используемой в КЭ научной аппаратуры. Излагается технология математической обработки изображений, позволившая считать их изображениями аэрозольного слоя, и формулируются условия, необходимые для его регистрации с околоземной орбиты. Рассматриваются возможные варианты происхождения данного аэрозольного образования.

## **Анализ измерений $\text{CH}_4$ и $\delta^{13}\text{C}$ в г. Москве в 2018-2020 гг.**

Березина Е.В., Беликов И.Б., Васильева А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В., Скороход А.И.,  
Белоусов В.А.

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[e\\_berezina\\_83@mail.ru](mailto:e_berezina_83@mail.ru)

**Ключевые слова:** *атмосферный воздух, Москва, метан, изотопная сигнатура, временная изменчивость, источники метана, метеорологические параметры*

Проведены измерения приземной концентрации  $\text{CH}_4$  и его изотопной сигнатуры  $\delta^{13}\text{C}$  в г. Москве на станции ИФА-РАН в период с 2018 по 2020 гг. Исследованы сезонные и суточные вариации приземного  $\text{CH}_4$  в условиях города. В среднем, концентрация метана в исследуемый период составила  $2,06 \pm 0,1$  ppm с наибольшими значениями в зимние и летние месяцы измерений. Полученные данные согласуются с измерениями  $\text{CH}_4$  на станциях Мосэкомониторинга.

Наиболее высокие концентрации  $\text{CH}_4$  (до 3,5 ppm) отмечены при восточном направлении ветра во все сезоны наблюдений.  $\delta^{13}\text{C}$  для таких случаев составляет -60 – -70‰, что характерно для увлажнённых почв, свалок и нефтехранилищ. Наиболее низкие значения изотопной сигнатуры приходятся на тёплую зиму 2020 г с положительными температурами воздуха.

Отмечена статистически значимая корреляция ( $R > 0.5$ )  $\text{CH}_4$  с  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и бензолом, что указывает на влияние источников метана, связанных со сжиганием ископаемого топлива. Проведена оценка вклада доли метана, связанной с эмиссиями от автотранспорта, который в среднем за исследуемый период составил  $27 \pm 9\%$  (с максимальным значением – 92%).  $\delta^{13}\text{C}$  для случаев с высокими концентрациями  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и бензола составила -45 – -50‰.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-17-00021.

## **Измерения состава атмосферы методом дифференциальной спектроскопии на сети станций ИФА им.А.М.Обухова РАН**

Боровский А.Н.<sup>1</sup>, Груздев А.Н.<sup>1</sup>, Елохов А.С.<sup>1</sup>, Постыляков О.В.<sup>1</sup>, Никитин С.В.<sup>2</sup>, Фатихов К.А.<sup>2</sup>, Шамсутдинов Д.Р.<sup>2</sup>, Бручковский И.И.<sup>3</sup>, Кирсанов А.А.<sup>4</sup>, Садовников С.А.<sup>5</sup>, Чуликов А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко" Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь*

<sup>4</sup>*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия*

<sup>5</sup>*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

[me@borovski.ru](mailto:me@borovski.ru)

**Ключевые слова:** DOAS, MAX-DOAS, NO<sub>2</sub>, HCHO, пограничный слой атмосферы

С участием ИФА РАН развёрнута российская Сеть наблюдений за малыми газовыми примесями с использованием методов дифференциальной спектроскопии. Измерения спектров рассеянного солнечного излучения в видимой и УФ областях спектра проводятся на стационарах ИФА РАН (Звенигородская научная станция, Кисловодская научная станция), ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН (Сибирская лидарная станция), ННИЦМО Белорусского государственного университета. ГУ. Измерительная аппаратура, работающая на станциях Сети, и разрабатываемые в ИФА РАН методы позволяют получать из измеренных спектров информацию о содержании двуокиси азота, формальдегида и других примесей в атмосфере, оценивать характеристики облачности. В работе представлено современное состояние проводимых в ИФА РАН исследований и перспективы разработки новых и развития существующих методов измерений содержания примесей в нижней тропосфере.

## **Изменчивость содержания кислорода в атмосфере Москвы по измерениям ГПБУ «Мосэкомониторинг»**

Виноградова А.А.<sup>1</sup>, Гинзбург А.С.<sup>1</sup>, Лезина Е.А.<sup>2</sup>, Помелова М.А.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ГПБУ «Мосэкомониторинг», Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, Москва, Россия  
[gin@ifaran.ru](mailto:gin@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** приземный воздух, Москва, кислород, сезонная и суточная изменчивость, газоанализатор

Изменчивость содержания кислорода в приземном воздухе больших городов вызывает озабоченность у жителей Москвы и других мегаполисов мира.

Летом 2010 года при высокой температуре и высокой абсолютной влажности приземного воздуха на ЕТР и особенно в Москве содержание кислорода в атмосферном воздухе было минимально, и жители мегаполиса испытывали все признаки гипоксии [1]. При похожих метеоусловиях в июле 2021 года в Москве люди испытывали те же проблемы.

Поступление кислорода в атмосферу даже в городских условиях почти полностью определяется дыханием растительности и почвы. Возможные процессы выведения кислорода из приземного воздуха: расход кислорода при сжигании топлива и химическом окислении различных составляющих в атмосфере, преобразование под действием солнечного излучения, сток в почву и на растительность. В городе факторами снижения содержания кислорода также являются загрязнение атмосферы угарным газом и наличие городского острова тепла.

Несмотря на важность изменений содержания кислорода во вдыхаемом воздухе, измерения концентрации кислорода в атмосферном воздухе городов осуществляются очень редко [2]. Только за последние годы стали появляться публикации, посвященные существенному снижению содержания кислорода в городской атмосфере в эпоху глобального потепления и загрязнения атмосферы [3].

На трех АСКЗА ГПБУ «Мосэкомониторинг» [4] с 2016 года проводятся регулярные измерения концентрации кислорода (в %) с помощью парамагнитного газоанализатора T802 (USA, [www.teledyne-api.com]), что дает уникальную возможность оценить качество воздуха, которым дышат москвичи. В тестовом режиме такие измерения ведутся с начала XXI века.

В докладе приводятся результаты обработки и анализа данных измерений за последние шесть лет, которые показывают ярко выраженный годовой ход процентного содержания кислорода в воздухе с летним минимумом.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН и при поддержке проекта РФФИ № 20–05–00254.

### **Литература:**

1. Гинзбург А.С. и др. Содержание кислорода в атмосфере крупных городов и проблемы дыхания // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 2. С. 5–19
2. Keeling, R. F., Manning, A. C. Studies of recent changes in atmospheric O<sub>2</sub> content. In Treatise on Geochemistry. 2014. Amsterdam: Elsevier. P. 385–404.
3. Yun Wei et al. Oxygen Level as an Emerging Concern to Global Cities // Environ. Sci. Technol. 2021, V. 55, P. 7808–7817.
4. Мосэкомониторинг. <https://mosecom.mos.ru/>

## Межгодовые, сезонные и суточные вариации содержания метана в приземном воздухе Москвы

Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Губанова Д.П.

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

[gin@ifaran.ru](mailto:gin@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** приземный воздух, Москва, метан, межгодовые, сезонные и суточные вариации

Исследована изменчивость концентрации метана в приземной атмосфере Москвы по данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» в 2005–2020 гг. [1]. Комплексность и разнонаправленность природных процессов в атмосфере и на поверхности создают изменчивую картину формирования поля метана в приземной атмосфере среднеширотного города.

Средняя годовая концентрация метана за рассматриваемый период составила  $1.369 \pm 0.035$  мг/м<sup>3</sup>. Разброс значений по данным разных станций выше, чем разброс среднегодовых величин, что связано с различиями районов города по инфраструктуре, типу и интенсивности локальных источников. В течение года концентрация CH<sub>4</sub> характеризуется минимальными значениями летом и максимальными в зимнее время, с промежуточным максимумом в августе–сентябре. Эти закономерности определяются эффективностью стоков метана из атмосферы, основным из которых является химическое взаимодействие в воздухе с гидроксидом OH– [2,3].

Выявлен минимум концентрации метана в Москве в 2010 и 2011 годах, что ассоциируется с жарким летом 2010 года, сопровождавшимся сильными пожарами на ЕТР и частичным высыханием болот – основного регулятора межгодовых вариаций содержания метана в атмосфере над северной Евразией. Обнаружено, что средняя концентрация метана в холодное полугодие тем ниже, чем выше средняя температура воздуха предшествующего теплого полугодия [4].

Короткопериодная (внутрисуточная) изменчивость концентрации метана, обусловленная вариациями в течение суток эффективности химических стоков CH<sub>4</sub> и приземной стратификации атмосферы, характеризуется более высоким содержанием метана в воздухе ночью, чем днем. В теплое полугодие (от мая до сентября) разница концентрации CH<sub>4</sub> между ночью и днем почти на порядок больше, чем зимой (0.12 и 0.016 мг/м<sup>3</sup>, соответственно). Промежуточный максимум концентрации метана в приземном воздухе в августе–сентябре проявляется только ночью, а дневные значения монотонно возрастают от летних месяцев к зимним.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20–05–00254).

### Литература:

1. Мосэкомониторинг. <https://mosecom.mos.ru/>
2. Семенов С.М. и др. Роль метана в современном изменении климата. М., 2018. 106 с.
3. Бажин Н.М. Метан в окружающей среде. // Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2010. Сер. Экология. Вып. 93. 56 с.
4. Виноградова А.А., Гинзбург А.С., Губанова Д.П. Изменчивость концентрации метана в приземном воздухе Москвы на разных временных масштабах // Изв. РАН. ФАО. 2022. Т. 58. № 2. С. 205–217.

## **Вариации радиационных характеристик аэрозоля при крупномасштабных задымлениях атмосферы**

Горчаков Г.И.<sup>1</sup>, Карпов А.В.<sup>1</sup>, Копейкин В.М.<sup>1</sup>, Семутникова Е.Г.<sup>2</sup>, Гушин Р.А.<sup>1</sup>, Даченко О.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

[gengor@ifaran.ru](mailto:gengor@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *Крупномасштабные задымления, дымовой аэрозоль, радиационные характеристики, альbedo однократного рассеяния, коэффициент преломления*

Крупномасштабные задымления приводят к радикальным изменениям радиационного режима атмосферы на больших территориях. Примером может служить крупномасштабное задымление Северной Евразии в июле 2016 г. [1]. По данным мониторинга тропосферного аэрозоля на станциях AERONET выполнено исследование вариаций радиационных характеристик дымового аэрозоля в области спектра 0.44-1.02 мкм в задымленной атмосфере Северной и Южной Америки, Австралии и Африки. В частности использованы данные мониторинга на станциях AERONET Bonanza Creek, Alta Floresta, Fowlers Gap и Ilorin в 2019-2020 г. На Аляске (станция Bonanza Creek) аэрозольная оптическая толщина на длине волны 440 нм достигала 3-4. Вклад в АОТ грубодисперсного аэрозоля, как правило, был незначительным. Альbedo однократного рассеяния (длина волны 440 нм) в задымленной атмосфере менялось от 0.90 до 0.99. При сильном задымлении мнимая часть коэффициента преломления варьировала примерно от 0.004 до 0.018, а модальный радиус частиц (для распределения объемов по размерам) достигал 0.15-0.25 мкм. При пожарах в лесах Южной Америки (станция Alta Floresta) вклад в АОТ грубодисперсного аэрозоля при сильных задымлениях составлял 4-6 %. Поглощательная способность аэрозоля по данным мониторинга на станциях Alta Floresta в среднем была выше, чем на Аляске, а модальные радиусы распределения по размерам – меньше, чем на станции Bonanza Creek. В Австралии и в Африке вклад в АОТ грубодисперсного (пылевого) аэрозоля заметно выше, чем в Северной и Южной Америке. Согласно данным мониторинга на Аляске и в Австралии наблюдались заметные проявления коричневого углерода в спектральных зависимостях коэффициента преломления [2].

### **Литература:**

1. Горчаков Г.И., Голицын Г.С., Ситнов С.А. и др. Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г // Доклады РАН. 2018. Т 482, № 2. С. 211-214.
2. Горчаков Г.И., Васильев А.В., Веричев К.С. и др. Тонкодисперсный коричневый углерод в задымленной атмосфере // Доклады РАН. 2016. Т. 471, №... С. 91-97.

## Смоги и пыльная мгла на Северной Китайской Равнине в 2019-2022 гг.

Горчаков Г.И.<sup>1</sup>, Копейкин В.М.<sup>1</sup>, Карпов А.В.<sup>1</sup>, Даценко О.И.<sup>1</sup>, Гушин Р.А.<sup>1</sup>, Пономарева Т.Я.<sup>2</sup>,  
Горчакова И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия  
[gengor@ifaran.ru](mailto:gengor@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** Смог, пыльная мгла, аэрозольная оптическая толщина, спутниковое лидарное зондирование, аэрозольное загрязнение атмосферы, экологические риски

Поступающий с опустыненных территорий в атмосферу пылевой аэрозоль переносится на большие расстояния. Примером здесь может служить перенос пылевого аэрозоля из пустыни Такла-Макан на Северную Китайскую Равнину, где часто наблюдаются оптически плотные смоги [1,2]. Повышенная аэрозольная нагрузка приводит к существенному изменению радиационного режима атмосферы и наносит ущерб здоровью населения. По данным измерений на станциях AERONET проанализированы вариации оптических и микрофизических характеристик тропосферного аэрозоля. Показано, что на Северной Китайской Равнине повышенные замутнения атмосферного воздуха наблюдаются при смогах (тонкодисперсный аэрозоль) и пыльной мгле (грубодисперсный или пылевой аэрозоль). Приведены оценки радиационных эффектов аэрозоля в смогах и при заносах пыльной мглы. Получены оценки содержания пылевого аэрозоля в толще атмосферы при заносах пыльной мглы и содержания тонкодисперсного аэрозоля в условиях смогах. По данным спутникового лидарного зондирования с использованием данных лидара CALIOP построены вертикальные профили коэффициентов ослабления в смогах и пыльной мгле. Получены оценки массовой концентрации аэрозоля в приземном слое атмосферы. Рассчитаны экологические риски, возникающие при заносах пылевого аэрозоля и смогах на Северной Китайской Равнине.

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

### **Литература:**

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Горчакова И.А. и др. Смог и дымная мгла на Северо-китайской равнине в июне 2007 г. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т.32. №06. С.458-464.
2. Горчаков Г.И., Даценко О.И., Копейкин В.М. и др. Пыльная мгла на Северо-Китайской равнине // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 12. С. 948–955.

## **Сравнение результатов натуральных измерений эмиссии метана с разнотипных водохранилищ РФ с данными Global Maps of Methane Emissions**

Гречушникова М.Г.<sup>1,2</sup>, Кравчук М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

[allavis@mail.ru](mailto:allavis@mail.ru)

**Ключевые слова:** метан, эмиссия, полевые данные, база данных

В работе проведено сопоставление данных полевых наблюдений, полученных на Иваньковском, Цимлянском и Чиркейском водохранилищах, с теоретическими значениями, содержащимися в базе данных (БД) (Johnson et al., 2021). Первичной основой для оценок являются данные натуральных измерений на 198 водохранилищах (Deemer et al., 2016). Сведения о продолжительности эмиссии метана в течение года основаны на спутниковых данных о ледовых явлениях. Водохранилища мира, учтённые в БД, отнесены к одному из трёх эко-климатических регионов: бореальному, умеренному или тропическому в зависимости от среднегодовой температуры почвы. Авторами БД учтены сезонные и внутрисезонные изменения удельного потока.

Сравнение с полевыми данными производилось по материалам экспедиционных работ в августе 2021 г. Удельный поток метана с поверхности Иваньковского водохранилища является единственной величиной, для которой оценка БД справедлива. Значения эмиссии метана с поверхности Цимлянского водохранилища в среднем примерно на порядок меньше указанных для данного водохранилища величин. Наибольшие расхождения (на два порядка) между результатами полевых измерений и оценочными значениями выявлены для Чиркейского водохранилища. В целом стоит отметить пренебрежение авторами БД такими важными факторами, влияющими на удельный поток метана, как проточность, глубина и особенности водосбора водного объекта.

На сегодняшний день не представляется возможным точно оценить объём парниковых газов, выделяющихся поверхностями водохранилищ из-за отсутствия единого подхода к параметризации потоков метана, малого пространственного охвата исследований и наличия ряда слабоизученных аспектов данной задачи.

### ***Литература:***

1. Johnson, M. S. Et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JG006305>.
2. Deemer B. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. Springer. BioScience, 2016, Vol. 66, № 11, 949 – 964 pp.

## **Многолетние тренды содержания NO<sub>2</sub> в стратосфере и тропосфере по результатам наземных и спутниковых (прибор OMI) измерений**

Груздев А.Н., Елохов А.С.

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

[a.n.gruzdev@mail.ru](mailto:a.n.gruzdev@mail.ru)

**Ключевые слова:** NO<sub>2</sub>, спектрометрические измерения, OMI, NDACC, тренд

Выполнено сопоставление линейных трендов содержания NO<sub>2</sub> в вертикальных столбах стратосферы и тропосферы, полученных по результатам спутниковых измерений с помощью прибора OMI и по данным наземных спектрометрических измерений на станциях Сети по обнаружению изменений состава атмосферы (NDACC) в 2004–2021 гг. Сеть включает Звенигородскую научную станцию ИФА им. А.М. Обухова РАН (ЗНС). Для оценок трендов использована модель множественной линейной регрессии, учитывающая также влияние на содержание NO<sub>2</sub> изменений крупномасштабной циркуляции и уровня солнечной активности. Для анализа трендов использованы данные десяти наземных станций в разных широтных поясах и сопутствующие им по дате данные OMI из 10-км окрестностей станций. Получены годовые и сезонно-зависимые оценки трендов. Тренды по спутниковым данным сопоставлены с трендами, полученными по данным наземных измерений. Тренды стратосферного содержания NO<sub>2</sub> на антарктической и арктических станциях в разные сезоны статистически незначимы по тем и другим данным. По тем и другим данным в средних широтах южного полушария (ЮП) получены отрицательные оценки тренды в весенний и, частично (только на островных станциях), летний сезоны. Соответствие между весенними трендами отмечено над Западной Европой. Тренды стратосферного содержания NO<sub>2</sub> над ЗНС по обоим наборам данных положительные зимой и статистически незначимые в другие сезоны. Несмотря на такое сходство, годовые оценки стратосферных трендов различны. Для тропосферного содержания NO<sub>2</sub> на ЗНС (данные имеются только для нее) соответствие результатов анализа трендов по спутниковым и наземным данным отмечено зимой (тренды положительные), в другие сезоны (тренды статистически незначимы) и в целом за год (тренды положительные). Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта 20-05-00274 (измерения на ЗНС, анализ трендов) и Российского научного фонда в рамках проекта 21-17-00210 (подготовка спутниковых данных).

**Сопоставление результатов многолетних измерений  
содержания NO<sub>2</sub> с помощью спутникового прибора OMI  
с данными наземных измерений**

Груздев А.Н., Елохов А.С.

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[a.n.gruzdev@mail.ru](mailto:a.n.gruzdev@mail.ru)*

**Ключевые слова:** NO<sub>2</sub>, спектрометрические измерения, OMI, NDACC, сопоставление

Выполнено сопоставление результатов измерений содержания NO<sub>2</sub> в вертикальных столбах стратосферы и тропосферы с помощью спутникового прибора OMI в 2004–2020 гг. с данными спектрометрических наземных измерений на станциях Сети для обнаружения изменений состава атмосферы (NDACC), включающей Звенигородскую научную станцию ИФА им. А.М. Обухова РАН (ЗНС). Разность между данными спутниковых и наземных измерений имеет заметный сезонный ход. Корреляция и коэффициенты линейной регрессии тоже зависят от сезона. Выявлены характерные закономерности изменения коэффициентов корреляции с широтой и особенности корреляции между спутниковыми и наземными данными в Арктике и Антарктике, средних широтах северного и южного полушарий, в тропиках. Для некоторых станций выявлена зависимость количественных характеристик соответствия между данными спутниковых и наземных измерений от облачности. В безоблачных условиях на ЗНС отмечено ослабление корреляции между спутниковыми и наземными значениями стратосферного содержания NO<sub>2</sub> и усиление корреляции между значениями тропосферного содержания NO<sub>2</sub>. Выявлена зависимость характеристик соответствия между данными спутниковых и наземных измерений от уровня загрязнения нижней тропосферы оксидами азота. Корреляция между значениями тропосферного содержания NO<sub>2</sub> в окрестности ЗНС при сильном загрязнении возрастает, а корреляция между значениями стратосферного содержания NO<sub>2</sub> уменьшается. По результатам сопоставления спутниковых и наземных данных получены оценки верхних пороговых значений содержания NO<sub>2</sub> в тропосфере на разных станциях. Наименьшие значения получены для полярных станций, а наибольшее – для ЗНС, сильнее всех подверженной антропогенному загрязнению ввиду близости московского мегаполиса. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта 20-05-00274 (измерения на ЗНС, анализ данных наземных измерений) и Российского научного фонда в рамках проекта 21-17-00210 (анализ спутниковых данных).

## **Приземный аэрозоль в Москве: фоновый уровень и эпизоды экстремального загрязнения атмосферы**

Губанова Д.П., Виноградова А.А., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Иорданский М.А.

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

[gubanova@ifaran.ru](mailto:gubanova@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** приземный аэрозоль, атмосфера, массовая концентрация, элементный состав, экстремальное загрязнение, фоновый уровень, аэрозольные источники, Москва

Исследование состава атмосферы и контроль качества воздуха городов в последние годы являются одной из самых актуальных проблем для всех стран и регионов [1]. В городских условиях смешение в приземном воздухе антропогенных и природных выбросов создает разнородное в пространстве поле загрязняющих примесей, быстро изменяющееся благодаря подвижности воздушных масс, влиянию метеорологических условий и активной химии газов и аэрозолей. Последние служат не только индикатором загрязненности воздуха, но и указывают на возможные источники загрязнений.

В ИФА РАН с 2019 года по настоящее время реализуется комплексный эксперимент по изучению изменчивости состава приземного аэрозоля в условиях мегаполиса [2]. По данным за весь период непрерывных наблюдений установлено, что в Москве при стабильной работе локальных источников (выбросы транспорта, промышленных предприятий, служб жизнеобеспечения, вынос частиц почвы и пыли и др.) создается более или менее устойчивый и невысокий уровень аэрозольного загрязнения городской атмосферы. В частности, средние сезонные значения среднесуточной массовой концентрации приземного аэрозоля PM<sub>10</sub> составили 20.8, 27.9, 16.7, 14.0 мкг/м<sup>3</sup> весной, летом, осенью и зимой соответственно.

Выявлено также несколько краткосрочных (2-10 суток) эпизодов с экстремальным увеличением значений массовой концентрации аэрозольных частиц и превышением ПДК (60 мкг/м<sup>3</sup>) для аэрозоля PM<sub>10</sub> [2], обусловленных региональным или дальним переносом примесей, которые составили не более 6 % от всего ряда полученных данных. Показано, что в эти дни существенный вклад в атмосферное загрязнение городского воздуха вносят эмиссии пылевого и дымового аэрозоля, способные переноситься на тысячи километров [3-5].

Обсуждается изменчивость элементного, массового и дисперсного состава приземного аэрозоля в периоды аномального роста его концентрации, а также происхождение такого аэрозоля.

Работа выполнена по Госзаданию ИФА РАН № 129-2022-0012 и при поддержке РФФИ (грант №19-05-50088).

### **Литература:**

1. Sokhi R. et al. Environment International. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>.
2. Gubanova D.P. et al. Atmosphere. 2022, <https://doi.org/10.3390/atmos13040574>
3. Schepanski K. Geosciences. 2018, <https://doi.org/10.3390/geosciences8050151>.
4. Hernandez A.J. et al. Atmospheric Environment. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.051>
5. Xiong, J. et al. J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105415>.

## **Разнообразие форм и состава аэрозольных частиц в приземной атмосфере Москвы вблизи сильного локального антропогенного источника**

Губанова Д.П.<sup>1</sup>, Садовская Н.В.<sup>2</sup>, Виноградова А.А.<sup>1</sup>, Иорданский М.А.<sup>1</sup>, Скороход А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

[gubanova@ifaran.ru](mailto:gubanova@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** атмосфера, аэрозольные частицы, биоаэрозоли, брохосомы, морфологическая структура, элементный состав, массовая концентрация, локальный антропогенный источник, Москва

Как известно, химический состав и морфологическая структура аэрозольных частиц оказывают сильное влияние на характер и кинетические параметры процессов, протекающих в атмосфере и приводящих к изменению её состава и климата Земли [1]. В условиях крупного города существенный вклад в разнообразие приземных аэрозолей вносят специфические антропогенные источники, роль которых при оценке изменчивости параметров состояния атмосферы и качества воздуха все еще недооценена.

В 2020–2022 гг. в ИФА РАН проводились комплексные исследования физико-химических характеристик приземного аэрозоля в Московском регионе с учетом влияния синоптико-метеорологических условий и городской среды [2]. Настоящий доклад посвящен результатам изучения влияния сильного локального антропогенного источника (демонтаж старых научно-производственных зданий и строительство жилого комплекса) на микрофизические характеристики, массовую концентрацию, элементный состав и морфологию приземного аэрозоля летом 2021 г. При интенсивной работе локального источника зарегистрировано максимальное (за весь период трехлетних наблюдений) аэрозольное загрязнение воздуха: величины массовой концентрации частиц PM<sub>10</sub>, превысили среднесуточное значение ПДК (60 мкг/м<sup>3</sup>) в 2–3 раза, а максимально разовое значение ПДК (300 мкг/м<sup>3</sup>) в 3–10 раз [3].

Рассмотрены разнообразная морфологическая структура, элементный и дисперсный состав аэрозольных частиц, наблюдаемых в этот период. Выявлены основные типы приземных аэрозолей: агломераты углеродсодержащих частиц конденсационного происхождения; алюмосиликаты; почвенные частицы с добавлением органики, антропогенных элементов и солей; биогенные частицы. В это же время в Москве впервые обнаружены биологические фуллереноподобные частицы – брохосомы [4]. Обсуждается роль биоаэрозолей во взаимодействии между атмосферой, биосферой и климатом.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФА РАН № 129-2022-0012, Госзадания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и при поддержке РФФИ (грант №19-05-50088).

### **Литература:**

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. 2nd ed. N.Y.: Wiley, 2006. 1232 p.
2. Gubanova D.P. et al. Atmosphere. 2022, <https://doi.org/10.3390/atmos13040574>
3. Губанова Д.П. и др. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021, <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-133-147>
4. Rakitov R. et al. Insect Biochemistry and Molecular Biology. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2018.01.001>.

## **Национальная система мониторинга состава атмосферы: актуальные проблемы и возможные пути их решения**

Еланский Н.Ф.

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

[n.f.elansky@mail.ru](mailto:n.f.elansky@mail.ru)

**Ключевые слова:** состав атмосферы, качество воздуха в городах, фоновые районы, трансграничный перенос загрязнений, наземный и космический мониторинг

В настоящее время в России приняты и уже действуют несколько государственных программ, направленных на развитие национальной системы мониторинга состава атмосферы. Постепенно проводится модернизация уже существующих систем наблюдения качества атмосферного воздуха в крупных городах, начинает формироваться структура биоклиматических полигонов (карбоновых полигонов) для измерения потоков климатически активных веществ. В повестке дня (уже много лет) - восстановление системы контроля трансграничного переноса загрязнений и организация мониторинга фоновое состояние атмосферы в удаленных районах (российская часть Глобальной службы атмосферы ВМО). Развертывание всех этих систем базируется на создании большого числа наблюдательных станций, объединенных в сети:

1. сеть станций мониторинга загрязнения воздуха в крупных городах;
2. сеть станций мониторинга климатически активных веществ (КП);
3. сеть станций мониторинга трансграничного переноса загрязнений;
4. сеть станций мониторинга фоновое состояние атмосферы (ГСА ВМО);
5. сеть станций валидации данных космического мониторинга атмосферы.

Актуальной задачей на современном этапе становится объединение сетей в единую интегральную систему мониторинга атмосферы, которое позволит оптимизировать количество и распределение станций по территории России, унифицировать приборные средства, упростить их калибровку, автоматизировать проведение измерений, сохранить на минимальном уровне штат квалифицированных специалистов и резко сократить эксплуатационные расходы. Также важно наладить сотрудничество с мировыми калибровочными центрами, центрами архивации и проверки качества данных, участвовать в международных сравнениях приборов и одновременно использовать несколько численных моделей атмосферы (ансамблевый подход) для усвоения и анализа результатов наблюдений. В докладе обсуждаются проблемы развития национальной системы мониторинга состава атмосферы и разработанные в ИФА им. А.М. Обухова РАН методы и подходы к решению некоторых из них.

## **Аэрозольная оптическая толщина в Московском регионе по спутниковым данным и ее влияние на расчет радиационных и метеорологических параметров в модели COSMO-RU**

*Жданова Е.Ю.<sup>1</sup>, Полухов А.А.<sup>1,2</sup>, Чубарова Н.Е.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия*

*[ekaterinazhdanova214@gmail.com](mailto:ekaterinazhdanova214@gmail.com)*

**Ключевые слова:** *аэрозольная оптическая толщина, спутниковые наблюдения, город, аэрозольное воздействие*

Влияние атмосферного аэрозоля на радиационные потоки, а, следовательно, на климат и погоду, является одним из сложно оценимых факторов. Восстановление пространственно-временного распределения атмосферного аэрозоля на территории Московского региона в настоящей работе получено на основе спутниковых данных с относительно высоким пространственным разрешением 1 км, получаемыми с помощью многоугольного алгоритма MAIAC [1]. Проведен детальный анализ пространственно-временных изменений аэрозольной оптической толщины (АОТ) на территории Московского региона за период 2002-2021 гг. Для валидации спутниковых данных использовались данные сети AERONET, представленные двумя станциями МО МГУ и Звенигород.

Показано, что спутниковые данные позволяют воспроизводить пространственное распределение аэрозольной оптической толщины, в том числе над поверхностью с достаточно высокой отражательной способностью, такая как городская среда. Была проанализирована временная изменчивость аэрозольной оптической толщины, и показано, что спутниковые данные воспроизводят наблюдаемый по наземным данным тренд уменьшения АОТ в Московском регионе.

Спутниковые восстановления АОТ в виде пространственных распределений средних многолетних значений и значений в отдельные дни были применены для экспериментов с моделью COSMO-Ru [2]. Эксперименты были проведены с целью оценки влияния аэрозольного содержания на расчет радиационных характеристик и температуры воздуха. Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы ЦИТИС 121051400081-7, а также при поддержке гранта номер 075-15-2021-574 Министерства науки и высшего образования РФ.

### **Литература:**

1. Lyapustin A., Wang Y., Korkin S., Huang, D. MODIS collection 6 MAIAC algorithm // Atmospheric Measurement Techniques. – 11(10). P. – 5741-5765.
2. Rivin G. S., Rozinkina I. A., Vil'Fand R. M., et al. The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development // Russian Meteorology and hydrology. – 2015. – V. 40. – №. 6. – P. 400-410.

## Оценки летней эмиссии парниковых газов из водохранилищ Ангарского каскада

Казанцев В.С.<sup>1</sup>, Кривенок Л.А.<sup>1</sup>, Ломов В.А.<sup>1,2,3</sup>, Гинзбург А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов, НИВЦ МГУ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Кафедра гидрологии суши, Географический факультет МГУ, Москва, Россия

[kazantsev@ifaran.ru](mailto:kazantsev@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** Пресноводные экосистемы, парниковые газы, метан, диоксид углерода

Летом 2021 года были проведены исследования эмиссии метана и диоксида углерода с поверхности Братского и Усть-Илимского водохранилищ. Они включали в себя измерения диффузионной (отдельно проводились измерения в дневное и ночное время) и пузырьковой составляющих эмиссии, дегазации через плотину и эмиссии из нижнего бьефа вследствие прохождения воды через гидроагрегаты ГЭС, а также потенциально влияющих на эмиссию свойств водохранилища и притоков. В работе использовались современные методы в соответствии с рекомендациями Международной гидроэнергетической ассоциации [1]. Получены оценки летней эмиссии парниковых газов с учётом пространственной вариабельности. Для всего Усть-Илимского водохранилища летняя эмиссия метана составляет 1038.31 тCH<sub>4</sub>, поглощение углекислого газа оценивается в 100209 тCO<sub>2</sub>. Летняя эмиссия с поверхности Братского водохранилища для метана и углекислого газа составляет соответственно 6396.69 тCH<sub>4</sub> и - 260555 тCO<sub>2</sub>. Данные хорошо согласуются с приведенными в литературных источниках для водоемов бореальной климатической зоны. Результаты в совокупности с оценками эмиссий для остальных сезонов года позволяют получить общие оценки эмиссии парниковых газов из водохранилищ Средней Сибири и способствуют созданию методической базы для проведения дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках выполнения договоров № 210/ДКС-89 "Инвентаризация выбросов парниковых газов от водохранилища Братской ГЭС в 2022 году" и № 210/ДКС-90 "Инвентаризация выбросов парниковых газов от водохранилища Иркутской ГЭС".

### **Литература:**

1. IHA. GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs. — UNESCO/IHA. — 2010.

## **Методические особенности оценки весеннего выброса парниковых газов из Братского водохранилища**

Казанцев В.С.<sup>1</sup>, Кривенюк Л.А.<sup>1</sup>, Ломов В.А.<sup>1,2,3</sup>, Гинзбург А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов, НИВЦ МГУ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Кафедра гидрологии суши, Географический факультет МГУ, Москва, Россия

[krivenok@ifaran.ru](mailto:krivenok@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** пресноводные экосистемы, парниковые газы, метан, диоксид углерода

На примере водоемов Западной Сибири [1] было показано, что придонное микробиологическое формирование метана происходит в том числе в период ледостава. Образующийся за это время  $\text{CH}_4$  аккумулируется в водном столбе и в виде вмёрзших и подледных пузырьков. Во время таяния льда накопленное количество метана, будет переходить в атмосферу за достаточно короткий промежуток времени. Весенний выброс необходимо учитывать в сезонных и годовых оценках эмиссии.

В начале апреля 2022 года было проведено рекогносцировочное исследование на Братском водохранилище на нескольких ключевых участках вблизи поселка Большеокское. Было выявлено, что глубина водохранилища является важным фактором, влияющим на накопление метана на той или иной вертикали: по мере перехода к мелководью концентрация метана в водном профиле растет нелинейно. Опробована методика определения «порогового» значения глубины водохранилища, ниже которого происходит это изменение. В пределах вертикального водного профиля  $\text{CH}_4$  распределен также неоднородно: повышение концентрации наблюдается в придонном и подледном горизонтах воды. Концентрация метана во вмёрзшем в лед пузырьке в 6.6 раза превышает максимальную концентрацию растворенного  $\text{CH}_4$  в подледном слое. Концентрация растворенного диоксида углерода в воде Братского водохранилища низкая вне зависимости от глубины и общей мощности водной толщи.

Работа выполнена в рамках выполнения договоров № 210/ДКС-89 "Инвентаризация выбросов парниковых газов от водохранилища Братской ГЭС в 2022 году" и № 210/ДКС-90 "Инвентаризация выбросов парниковых газов от водохранилища Иркутской ГЭС".

### **Литература:**

1. Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P. et al. Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // Nature. 2006. V. 443. № 7107. — P. 71—75.

## **Влияние гидрометеорологических факторов на удельные потоки парниковых газов из водохранилищ Ангарского каскада**

Казанцев В.С.<sup>1</sup>, Кривенко Л.А.<sup>1</sup>, Ломов В.А.<sup>1,2,3</sup>, Гинзбург А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Лаборатория суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов, НИВЦ МГУ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Кафедра гидрологии суши, Географический факультет МГУ, Москва, Россия

[lomson620@mail.ru](mailto:lomson620@mail.ru)

**Ключевые слова:** пресноводные экосистемы, парниковые газы, метан, диоксид углерода

В рамках проекта по исследованию эмиссии парниковых газов (метана и  $\text{CO}_2$ ) с поверхности водохранилищ Ангарского каскада одной из задач было выявление статистически значимых зависимостей между удельными потоками  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в атмосферу и факторами окружающей среды. Серия исследований на Братском, Усть-Илимском и Иркутском водохранилищах проводится с 2020 года и включает в себя полевые кампании в разные сезоны года для получения репрезентативных оценок эмиссий.

Наиболее значимая зависимость, характерная для всех исследуемых водоемов и всех сезонов года – убывание удельных потоков диоксида углерода при увеличении pH воды, так как поток  $\text{CO}_2$  на границе «вода-атмосфера» зависит от активности фитопланктона. При фотосинтезе потребляется углекислый газ, из-за чего его концентрация в воде становится меньше, чем в воздухе, и начинается поглощение. При этом величина pH увеличивается из-за смещения карбонатного равновесия в правую сторону. Выявлено, что граничным значением, при котором происходит смена направления потоков  $\text{CO}_2$ , является pH равное 8. Также выявлена закономерность между удельными потоками метана и глубинами точек измерения. Чем больше расстояние от донных отложений до водной поверхности, тем большая часть потока может быть окислена. Кроме того, на глубоководных станциях температура воды у дна может быть ниже, и по этой причине генерация метана менее интенсивна.

Значимость зависимостей проверялась с помощью F-критерия для регрессий, а также по коэффициенту корреляции Пирсона и индексу Тейла. Полученные зависимости могут помочь при планировании новых полевых кампаний на различных водных объектах, а также способствуют более детальному пониманию процессов, связанных с исследуемыми парниковыми газами в водных экосистемах.

Работа выполнена в рамках выполнения договоров № 210/ДКС-89 "Инвентаризация выбросов парниковых газов от водохранилища Братской ГЭС в 2022 году" и № 210/ДКС-90 "Инвентаризация выбросов парниковых газов от водохранилища Иркутской ГЭС"

## **Оценка общего содержания озона и углекислого газа по спутниковым измерениям в ИК области спектра**

**Киселева Ю.В., Рублев А.Н., Голомолзин В.В.**

*Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Москва, Россия  
[julia.v.kiseleva@mail.ru](mailto:julia.v.kiseleva@mail.ru)*

**Ключевые слова:** *общее содержание озона, углекислого газа, ИК каналы, SEVIRI, ИКФС-2*

В докладе представлена методика оценки общего содержания озона ( $\text{XO}_3$ ) и углекислого газа ( $\text{XCO}_2$ ) по спутниковым измерениям в инфракрасной области спектра. Используется регрессионный алгоритм определения  $\text{XCO}_2$ , где предикторами являются эффективные оптические толщины  $\tau_{\text{эфф}}$ , рассчитанные в нескольких каналах российского фурье-спектрометра ИКФС-2 в диапазоне 8-14 мкм, которое захватывает коротковолновое крыло полосы поглощения  $\text{CO}_2$  в районе 15 мкм. В качестве опорных данных применяются измерения концентрации углекислого газа на высотной мачте международной обсерватории ZOTTO (Центральная Сибирь) и в обсерватории NOAA на вулкане Мауна-Лоа (остров Гавайи). Расхождение рассчитанных оценок  $\text{XCO}_2$  с измеренными спутниковым спектрометром OCO KA OCO-2 в безоблачных условиях не превышало 2.3 ppm [1]. С использованием аналогичного подхода по вычислению эффективных оптических толщин разработана методика оценки  $\text{XO}_3$  по измерениям в каналах 9.7, 10.8 и 12.0 мкм радиометра SEVIRI, установленного на европейском геостационарном космическом аппарате Meteosat-11. В качестве априорной информации привлекались измерения аппаратуры Ozone Monitoring Instruments (OMI), установленной на полярно-орбитальном космическом аппарате Aura. Результаты валидации показали хорошее совпадение оценок SEVIRI и OMI. Основным преимуществом представленных методик является отсутствие необходимости точного задания профиля температуры и применимость в облачных условиях.

### **Литература:**

1. Голомолзин В.В., Рублев А.Н., Киселева Ю.В. и др. Метеорология и гидрология. 2022. № 4 С. 79-95.
2. Киселева Ю.В. Определение общего содержания озона по данным измерений радиометров геостационарных гидрометеорологических космических аппаратов // Тезисы докладов Восьмой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: ВНИИЭМ, 2020. 78 с.

## **Экспериментальные исследования электризации ветропесчаного потока**

Копейкин В.М., Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гушин Р.А., Даденко О.И., Бунтов Д.В.  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[kopeikin@ifaran.ru](mailto:kopeikin@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** Ветропесчаный поток, электризация, электрические токи сальтации, аэрозольные токи, лабораторные эксперименты

Проанализированы результаты полевых и лабораторных экспериментов по исследованиям электризации ветропесчаного потока. Выполнены систематические измерения электрических токов сальтации и удельного заряда сальтирующих частиц на опустыненных территориях Калмыкии и Астраханской обл. в условиях квазинепрерывной и всплесковой (перемежающейся) сальтации [1,2]. Установлено, что напряженность электрического поля в ветропесчаном потоке определяется плотностью электрических зарядов на подстилающей поверхности и электрическими токами сальтации. Исследованы вариации электрических токов, обусловленных переносом заряженных частиц пылевого аэрозоля, который генерируется на подстилающей поверхности под воздействием ветропесчаного потока (процесс sandblasting). Показано, что в ветропесчаном потоке сальтация может происходить благодаря электрическим разрядам на подстилающей поверхности [1]. Создан лабораторный стенд для исследования процессов электризации в ветропесчаном потоке. В лабораторных экспериментах зарегистрированы электрические токи переноса частиц пылевого аэрозоля и измерены концентрации частиц пылевого аэрозоля. При скорости воздушного потока 6 м/с электрические токи переноса частиц пылевого аэрозоля («аэрозольные токи») могут достигать  $1.5\text{--}2 \text{ нА/м}^2$ . Обнаружено, что при обтекании диэлектрических препятствий потоками заряженных частиц на их поверхности достигается высокая плотность электрических зарядов. Получены оценки электрических сил, действующих на частицы в ветропесчаном потоке. Показано, что в типичных условиях и при отсутствии электрических разрядов на подстилающей поверхности действующие на сальтирующие частицы электрические силы сравнительно малы.

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

### **Литература:**

1. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В. и др. Электризация ветропесчанного потока на опустыненных территории // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022, Т. 505, № 1. С. 89–94.
2. Г.И. Горчаков, В.М. Копейкин, А.В. Карпов и др. Пылевая плазма ветропесчаного потока на опустыненных территориях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т.58, № 5. С. 543-553.

## **Исследование радиационных процессов в атмосфере радиозондом с оптическим датчиком**

**Кочин А.В.**

*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область  
[amarl@mail.ru](mailto:amarl@mail.ru)*

**Ключевые слова:** коэффициент поглощения света, вертикальный профиль, радиозонд, оптический датчик

Характер изменения погоды и климата в значительной мере определяются радиационными процессами в атмосфере вследствие поглощения оптического излучения. Интегральное поглощение измеряется мировой актинометрической сетью, но оно зависит от коэффициента поглощения и толщины поглощающего слоя. С целью измерения вертикального профиля коэффициента поглощения на стандартный радиозонд был установлен оптический датчик (1). Выходной сигнал датчика очень сильно флуктуирует, что потребовало создание специального алгоритма обработки. Высоты резких изменений в величине сигнала оптического датчика совпали с инверсионными слоями в профиле температуры, что соответствует известным представлениям об уменьшении в инверсионном слое концентрации аэрозолей и увеличении их концентрации под ним. Обнаружено резкое уменьшение коэффициента затухания света на уровне тропопаузы. Существование такой резкой границы в коэффициенте затухания ранее не было установлено. Таким образом, оптические свойства воздуха ниже тропопаузы резко отличаются от воздуха над тропопаузой и основное поглощение света происходит в тропосфере. Высота тропопаузы, рассчитанная по профилю температуры, практически одинакова с высотой резкого изменения коэффициента ослабления. Было измерено отношение сигнала оптического датчика радиозонда на уровне Земли к сигналу на высоте 20 км. Увеличение высоты тропопаузы приводит к уменьшению этого соотношения и, соответственно, увеличению затухания в тропосфере. полное ослабление солнечного излучения в видимом диапазоне главным образом определяется высотой тропопаузы. Простота использования и низкая стоимость разработанного датчика существенно не изменит стоимость радиозондирования на существующих аэрологических станциях, что позволяет организовать регулярные измерения вертикального профиля коэффициента поглощения.

### **Литература:**

1. Kochin & al. 2021. Examination of Optical Processes in The Atmosphere During Upper Air Soundings. JAOT. DOI: 10.1175/JTECH-D-20-0158.1 2.

## Поток бериллия-7 из атмосферы в г. Севастополь

Кременчуцкий Д.А., Батраков Г.Ф.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

[d.kremenchutsky@gmail.com](mailto:d.kremenchutsky@gmail.com)

**Ключевые слова:** бериллий-7, поток, скорость удаления, метеопараметры

Бериллий-7 – естественный радионуклид космогенного происхождения, который образуется в атмосфере в результате взаимодействия потока космических лучей с кислородом и азотом. В атмосфере бериллий-7 обнаруживается на частицах аэрозолей. Этот радионуклид широко используется в роли трассера процессов, управляющих пространственно-временной изменчивостью содержания аэрозолей в атмосфере. Цель настоящей работы заключается в выявлении факторов, управляющих сезонной изменчивостью скорости осаждения бериллия-7 из атмосферы на подстилающую поверхность.

В исследовании представлены натурные данные о временной изменчивости суммарного потока бериллия-7 из атмосферы на подстилающую поверхность, полученные в период 2012–2013 гг. в г. Севастополь. Используя эти данные получены количественные оценки скорости удаления атмосферного аэрозоля в результате «сухой» и «суммарной» очистки атмосферы. Установлено, что имеет место сезонная изменчивость скорости удаления, связанная с внутригодовой изменчивостью количества и частоты выпадения осадков: месяцы с повышенным количеством и частотой выпадения осадков характеризуются повышенными значениями скорости удаления. Согласно проведенным оценкам, средние величины скорости сухого и суммарного удаления составили 0,13 см/с и 0,6 см/с, соответственно. Вклад потока сухих выпадений в годовую величину суммарного потока не превышает 22%.

Временные ряды были получены в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0005, анализ данных был выполнен в рамках проекта РНФ № 22-77-10056.

## **Восстановление ночных распределений О и Н на высотах мезосферы – нижней термосферы по данным спутниковых измерений**

Куликов М.Ю., Беликович М.В., Чубаров А.Г., Дементьева С.О., Фейгин А.М.

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

[kulm@ipfran.ru](mailto:kulm@ipfran.ru)

**Ключевые слова:** *область мезопаузы, возбужденный гидроксил, спутниковые измерения, атомарный кислород, атомарный водород*

База данных спутниковой кампании SABER/TIMED включает в себя результаты восстановления ночных распределений О, Н и некоторых других характеристик на высотах мезосферы – нижней термосферы по данным многолетних измерений профилей объемной скорости эмиссии  $\text{OH}^*$  вблизи 2 мкм, температуры и озона. В основе процедуры восстановления лежит приближение химического равновесия ночного озона, а также модель двух возбужденных уровней ОН ( $v=9,8$ ), формирующих указанное излучение. В данной работе модернизированная модель этих уровней с константами, соответствующими опубликованным данным, применена для восстановления О, Н, ОН,  $\text{HO}_2$  и химического нагрева на высотах 80-100 км по данным измерений в 2002-2021 гг. Обнаружено, что новые параметры процедуры восстановления приводят к значительным (до 200% и более) изменениям распределений всех указанных характеристик.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00064,

<https://rscf.ru/project/22-12-00064/>

## Результаты непрерывных измерений метана на НИС Ледовая база «Мыс Баранова» в 2015 – 2020 гг.

Лоскутова М.А.<sup>1</sup>, Макштас А.П.<sup>1</sup>, Лаурила Т.<sup>2</sup>, Асми Э.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Финский метеорологический институт, Хельсинки, Финляндия

[loskutova@aari.ru](mailto:loskutova@aari.ru)

**Ключевые слова:** парниковые газы, метан, фоновые концентрации

В настоящем исследовании была предпринята попытка выделения фоновых концентраций и изучения сезонной и межгодовой изменчивости метана на арктической станции Ледовая база «Мыс Баранова» (79°16' с. ш., 101°45' в. д.) в 2015 – 2020 гг. Измерения проводились газоанализатором Picarro G2401. Для выделения фоновых значений к исходным данным был применен ряд фильтров. Измерения были сопоставлены с данными других арктических станций, являющимися поставщиками данных Мирового Центра Данных по парниковым газам – Алерт (82°29' с. ш., 62°21' з. д.), Барроу (71°18' с. ш., 156°44' з. д.) и Паллас (67°58' с. ш., 24°07' в. д.).

Основные результаты:

- за рассматриваемый промежуток времени прослеживаются положительные тренды: среднегодовой прирост метана за пятилетний период на ЛБ Мыс Баранова составил  $11.7 \pm 0.5$  млрд-1/год, причём максимальный прирост наблюдался с 2019 по 2020 гг., как и на станциях Алерт и Паллас (порядка 20 млрд-1/год). 2017-й год отличается наличием отрицательного прироста метана на станциях ЛБ Мыс Баранова и Барроу.
- среднегодовые значения метана на всех станциях демонстрируют устойчивый рост из года в год. Среднегодовое значение на ЛБ Мыс Баранова за пятилетний период составило  $1956 \pm 21$  млрд-1.
- амплитуда годового хода метана на всех станциях находится в пределах 40 – 70 млрд-1. Годовой минимум метана на ЛБ Мыс Баранова и станции Алерт наблюдается в среднем на 190 сутки, в Палласе и Барроу он наступает на 30-40 дней раньше.
- применение вероятностной модели для анализа переноса повышенных концентраций метана в окрестностях НИС показало прямую зависимость с местной орографией в холодное время года. Концентрации метана выше 80%-го квантиля в это время приходят только при сильных ветрах (от 15 м/с) юго-западного направления. Летом появляются очаги повышенных концентраций метана при северо-западных и северо-восточных направлениях ветра, при скоростях 7 – 15 м/с, что вероятно может быть связано с локальными источниками.

## **Звуковой фиксинг золавого выноса**

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.

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

[Elen\\_am@inbox.ru](mailto:Elen_am@inbox.ru)

**Ключевые слова:** ветровой вынос, сальтация, методы измерений

Для пустынных и полупустынных территорий при превышении порога скорости ветра характерны скачкообразные перемещения частиц 80–200 мкм вблизи поверхности – сальтации. Концентрация пыли в приповерхностном слое связана с потоком сальтации и особый интерес вызывают экспериментальные исследования интенсивности массопереноса вблизи поверхности на высотах нескольких сантиметров.

В экспедиционных измерениях в Калмыкии в 2021 г. на высоте 2–5 см в стальном, хорошо резонирующем от ударов частиц, боксе (7х7х8 см) был установлен сверхчувствительный цифровой диктофон EDIC-mini Card24S A101. Проводилась непрерывная 32 кГц запись акустических сигналов в различных ветровых условиях: как в тихую штилевую погоду, так и во время прохождения фронта с шквальным усилением ветра до 22.6 м/с 22 июля с 18:30 до 20:15. Спектры шумов, полученные в результате анализа нескольких участков записи в разные дни, оказываются весьма близкими по своей структуре. Удары частиц отчетливо слышны, различны по громкости и высоте звучания, что можно связать с различием скоростей движущихся ударяющихся частиц и углом их удара о поверхность бокса.

Проведена статистическая обработка сигнала записи. При разных ветровых условиях в спектре более часто присутствуют колебания с частотами 5, 9, 13, 19 кГц. В частотах, ниже 3 кГц, отражается информация о числе ударов частиц о поверхность контейнера.

Так как имеется связь концентраций пылевого аэрозоля с потоком сальтирующих частиц, проведено сравнение значений для числа пиков заданной частоты, отражающих удары частиц при сальтациях, полученных при акустическом анализе, с числом микрочастиц (0.3–1 мкм), регистрируемых фотометром «Феникс – М» на высоте 0.2 м (измерения проводились также на высотах 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 м). Наилучшие корреляции сравниваемых рядов для скоростей ветра 3.5–5 м/с. Расхождения при меньших скоростях связываются с преобладанием конвективного выноса, а при больших скоростях усилением откалывания и генерации микрочастиц. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-17-00214.

## О вертикальном распределении пылевого аэрозоля в приземном слое

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С., Лебедев В.А.

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

[elen\\_am@inbox.ru](mailto:elen_am@inbox.ru)

**Ключевые слова:** пылевой аэрозоль, динамика приземного слоя

Изменение концентрации пылевого аэрозоля с высотой над аридными и субаридными территориями [1] определяется соотношением скоростей его эмиссии и выноса за пределы рассматриваемого слоя воздуха. Генерация пыли при скоростях ветра, превышающих критические значения ( $\sim 3.5\text{--}5$  м/с на высоте 1 м), происходит при откалывании (фрагментации) в момент падения на поверхность сальтирующих частиц размерами порядка 80-150 мкм [1]. Профиль концентрации имеет степенной характер [2,3]. Показатель степени зависит от распределения частиц по размерам и принимает значения - [4]. В дневные часы в летнее время ( $\sim 9.00\text{--}15.00$ ) [5] на подъем пыли в 20-40% случаев наряду с ветровым выносом влияют конвективные потоки [5].

На основе многоуровневых (0.2, 0.4, 0.8, 1.6 и 3.2 м) измерений 2020-2021 г. в Калмыкии получены степенные профили концентрации пылевого аэрозоля. Наиболее часто наблюдаемые показатели степени близки к  $-1/2$  и  $-1$ . Значения  $-1$  соответствуют усилению ветра и изменению его направления к касательному по отношению к линии дюнных гряд. Усиление ветра в дневное время также хорошо коррелирует с «впрысками» пыли до высоты 1.5 м. Корреляции температуры поверхности с концентрациями пыли на нижнем уровне достигают максимума для осредненных по 30 минутам значений концентраций, что говорит о накопительном эффекте влияния ее нагрева.

Как показано, наблюдаемые наклоны профиля обусловлены особенностями подъема микрочастиц. Их скорость определяется подъемной силой, действующей на прогретый пузырек воздуха вокруг горячей микрочастицы пыли, отделившейся от перегретой поверхности. Так как количество теплоты, выделяемое микрочастицей, зависит от ее массы, на степень профиля концентрации влияет вид распределения микрочастиц по размерам. Отмечается, что с учетом механизмов генерации пылевого аэрозоля [6] наклон профиля при преобладании мелкой фракции пыльного аэрозоля (0.3-1 мкм) близок к  $-2/9$ , а для крупной фракции (1-4 мкм) – к  $-4/3$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-17-00214.

### Литература:

1. Shao Y. Physics and modeling of wind erosion. Springer. 2009.
2. Баренблатт Г.И., Голицын Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. М. 1973.
3. Gillies J. A., Berkofsky L. J. Sed. Res. 2004. 74(2), 176-183.
4. Li X.L. et al. J. Geophys. Res. 2014. 119(16), 9980-9992.
5. Ju T. et al. Atm. Env. 2018. 187(1), 62-69.
6. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О. Изв. РАН. ФАО. 2021. 57(5). 539-554.

**О тенденциях риска для растительности АЗРФ  
от загрязнения атмосферы дальним переносом  
в условиях изменяющегося климата в 1980-2050 гг.**

Матешева А.В., Макоско А.А., Лысова О.В.  
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[matesheva@ifaran.ru](mailto:matesheva@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** АЗРФ, загрязнение атмосферы, изменение климата, риск для растений

Исследована динамика риска для растительности на материковой части АЗРФ от дальнего загрязнения атмосферы SO<sub>2</sub> потенциальными источниками (включая источники трансграничного загрязнения) в 1980-2050 гг. с точки зрения влияния погодно-климатических факторов по сценариям изменения климата RCP4.5 и RCP8.5. Исследование выполнено на основе методологии оценки риска от загрязнения окружающей среды U.S. EPA [1]. Методология оценки концентрации примеси базируется на решении сопряженного уравнения переноса и диффузии примеси [2].

Расчеты показали, что за прошедшие десятилетия на большей части АЗРФ отмечена тенденция к снижению риска, особенно заметная на севере ЕТР и Западной Сибири. В прогнозный период до 2050 г. показана незначительная динамика риска, характеризующаяся межсценарной изменчивостью и дисперсией по территории АЗРФ. В целом, при «умеренном» сценарии (RCP4.5) наблюдается тенденция к увеличению риска для растений, при «жестком» сценарии (RCP8.5) – к снижению.

Отмечено общее сходство в динамике риска для растительности и вариациях направлений переноса загрязняющих примесей [3]. Так, более высокая вариабельность в направлениях дальнего поступления примесей характерна для севера ЕТР, районов Сибири ниже 70° с. ш., восточной части Дальнего Востока. В основном именно на этих территориях прослеживается и наибольшая динамика риска. С учетом [3], в прогнозном периоде область наиболее опасных для растительности Арктики источников загрязнения сместится с ЗЮЗ-ЮЗ на ЮЮЗ-ЮВ направления по отношению к районам АЗРФ. Характер динамики риска в данном случае объясняется усилением меридионального переноса вследствие изменений климата, в результате которого меняются количество поступающих примесей и области влияния на арктические районы при дальнем загрязнении.

Полученные результаты актуальны при стратегическом планировании развития АЗРФ и мер по обеспечению ее экологической безопасности.

**Литература:**

1. Ecological Risk Assessment. U.S. EPA. Available at: <https://www.epa.gov/risk/ecological-risk-assessment>.
2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
3. Макоско А. А., Матешева А. В. Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы Арктической зоны России в 1980-2050 гг. с учетом сценариев изменения климата // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 45—52. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-45-52.

## **Концентрация метана и значения $\delta^{13}\text{C}$ в метане над арктическими морями летом и осенью по данным морских экспедиций**

Панкратова Н.В.<sup>1</sup>, Беликов И.Б.<sup>1</sup>, Скороход А.И.<sup>1</sup>, Белоусов В.А.<sup>1</sup>, Муравья В.О.<sup>2,3</sup>, Флинт М.В.<sup>2</sup>,  
Березина Е.В.<sup>1</sup>, Новигатский А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Россия  
[n\\_pankratova@list.ru](mailto:n_pankratova@list.ru)

**Ключевые слова:** Арктика, метан, судовые измерения, воздушные массы, траекторный анализ

Определение источников эмиссий метана в Арктике остается сложной задачей в силу их неоднородности и разнообразия. Измерения, проводимые в непосредственной близости от источников выбросов, помогают уточнить выбросы и уменьшить эти неопределенности. В данной работе анализируются данные пяти экспедиций, проведенных в западных арктических морях арктической весной, летом и ранней осенью 2020 и 2021 гг., в ходе которых были получены непрерывные данные о концентрации метана и его изотопной сигнатуре  $\delta^{13}\text{C}$ . Концентрации  $\text{CH}_4$  и  $\delta^{13}\text{C}$  демонстрировали временные и пространственные вариации. Так, в экспедициях 2020 г. минимальные значения концентрации метана, в среднем  $1.937 \pm 0.010$  ppm, отмечены в Северном и Норвежском морях, максимальные – над акваторией Карского (в среднем  $1.998 \pm 0.030$  ppm, до 2.000–2.040 ppm в максимумах) и Белого (в среднем  $2.006 \pm 0.030$  ppm) морей. Средние значения величины  $\delta^{13}\text{C}$  в исследованном районе были близки к характерным для Северного полушария –  $-47.5\text{‰}$ . В экспедициях 2021 г. Значения метана и  $\delta^{13}\text{C}$  менялись в пределах от 1,952 до 2,694 ppb и от  $-54,7\text{‰}$  до  $-40,9\text{‰}$  соответственно. Выявлена четкая корреляция между приземной концентрацией метана и направлением воздушного потока в период измерений. В то же время, даже при адвекции из районов со значительной антропогенной нагрузкой или из мест добычи и транспортировки природного газа мы не можем выделить конкретный источник выбросов; происходит разбавление или смешение газа из разных источников. Наши результаты указывают на следы источников метана из водно-болотных угодий, источников пресной воды, шельфовых отложений и даже гидратов.

**Валидация данных по тропосферному и стратосферному  
содержанию NO<sub>2</sub> TROPOMI наземными измерениями  
спектрометра ЗНС ИФА РАН**

Ракитин В.С., Груздев А.Н., Сафронов А.Н., Кириллова Н.С., Федорова Е.И., Елохов А.С.  
*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[vadim@ifaran.ru](mailto:vadim@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** NO<sub>2</sub>, спектрометрические измерения, TROPOMI, валидация

Выполнено сопоставление результатов измерений тропосферного и стратосферного содержания NO<sub>2</sub> с помощью спутникового прибора TROPOMI в 2018–2020 гг. с данными наземных зенитных сумеречных измерений на Звенигородской научной станции. Установлено, что степень соответствия спутниковых и наземных измерений зависит от сезона, облачных условий, высоты пограничного слоя атмосферы.

Содержание примеси в столбе стратосферы по данным TROPOMI в целом за весь период сопоставления несколько меньше, чем по данным измерений на ЗНС. Содержание NO<sub>2</sub> в тропосферном столбе в окрестности ЗНС по данным TROPOMI в целом превышает тропосферное содержание, полученное наземным прибором в среднем на 10<sup>15</sup> молек/см<sup>2</sup>.

Корреляция между спутниковыми и наземными данными в период с весны по осень лучше, чем зимой. При этом корреляция измерений TROPOMI в тропосфере с данными ЗНС выше, чем корреляция данных орбитального прибора OMI.

В малооблачных условиях отмечается более слабая корреляция между спутниковыми и наземными стратосферными содержаниями и более сильная корреляция тропосферных измерений NO<sub>2</sub> по сравнению с облачными условиями.

Коэффициент корреляции КК между тропосферными значениями NO<sub>2</sub> по данным TROPOMI и ЗНС оказался чувствительным к высоте ПСА. Значение КК возрастает с увеличением нижнего порогового значения высоты ПСА в пределах от 0 до 1200 м. КК между стратосферными содержаниями NO<sub>2</sub> имеют относительно более высокие значения при нижних пороговых значениях высоты ПСА от 0 до 1 км. В диапазоне высот ПСА более 0.5–1 км отмечено наилучшее соответствие одновременно тропосферных и стратосферных значений содержания NO<sub>2</sub> TROPOMI данным ЗНС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного фонда, проект № 21-17-00210 (обработка и анализ спутниковых данных) и Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-05-00274 (измерения на ЗНС и подготовка наземных данных к сопоставлению).

## **Валидация измерений общего содержания СО орбитального прибора TROPOMI данными наземных спектрометров ИФА РАН в Москве и Звенигороде**

Ракитин В.С., Кириллова Н.С., Федорова Е.И., Сафронов А.Н., Казаков А.В., Джола А.В.,  
Гречко Е.И.

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*  
[n.kirillova65@gmail.com](mailto:n.kirillova65@gmail.com)

**Ключевые слова:** окись углерода, общее содержание, атмосферная спектроскопия, TROPOMI, валидация

Представлены результаты валидации измерений содержания оксида углерода СО орбитального спектрометра высокого разрешения TROPOMI наземными спектроскопическими измерениями в пунктах ИФА им. А.М. Обухова РАН Москва и Звенигородская научная станция (ЗНС) в период 28.06.2018 – 31.12.2021. С помощью разработанного в ИФА РАН многофункционального программно-аппаратного комплекса TROPOMI\_tools [1] выполнены расчеты зависимости параметров корреляции орбитальных и наземных данных от альбедо подстилающей поверхности, наблюдаемых углов и высоты пограничного слоя атмосферы ПСА в разном пространственном разрешении данных TROPOMI (0.1x0.1, 0.25x0.25 и 0.5x0.5 градуса).

Получена высокая корреляция орбитальных измерений TROPOMI с наземными ( $R=0.81 - 0.97$  в зависимости от пункта, разрешения и применяемой фильтрации). Установлено отсутствие влияния альбедо на параметры корреляции орбитальных и наземных данных. Получено улучшение корреляции при наблюдаемых азимутальных углах менее 40 градусов по модулю (до  $R=0.97$ ), а также при росте высоты ПСА (до  $R=0.91$ ) и отсутствие значимой зависимости параметров корреляции от наблюдаемых зенитных углов.

Область проведенного исследования более обширна, а период сопоставлений более продолжительный, чем в опубликованных международным коллективом результатах валидации TROPOMI по СО на основе сопоставления с измерениями наземных станций NDACC и TCCON [2]. Полученные параметры корреляции в целом соответствуют результатам этого международного сравнения, а относительная разность (невязка) между спутниковыми и наземными данными ИФА РАН меньше ( -1.6% и 0.9% в Москве и ЗНС соответственно против 3.1 – 6.5 %, полученных в [2]).

Измерения ОС СО в Москве и Звенигороде и их обработка выполнены в рамках Государственного задания № FMWR-2022-0010. Обработка спутниковой информации, а также расчеты параметров корреляции орбитальных и наземных данных выполнены при поддержке Российского Научного фонда, проект № 21-17-00210.

### **Литература:**

1. Ракитин В.С., Груздев А.Н., Кириллова Н.С., и др. Валидация результатов измерений содержания NO<sub>2</sub> в тропосфере и стратосфере с помощью спутникового прибора TROPOMI по наземным измерениям на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН // Опт. Атм. и Океана. 2022. В печати
2. Sha M. K., Langerock B., L. Blavier J.-F., et al. Validation of methane and carbon monoxide from Sentinel-5 Precursor using TCCON and NDACC-IRWG stations // AMT. 2021. 14. 6249–6304

## **Пространственно-временная оценка влияния гроз на природные пожары в Австралии в 2017–2020 годах с использованием данных космических наблюдений ISS LIS и MODIS**

Сафронов А.Н.

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

[safronov\\_2003@mail.ru](mailto:safronov_2003@mail.ru)

**Ключевые слова:** Австралия, ISS LIS, сухие грозы, пожары, MODIS, карта растительности, ГИС система

В (Safronov, 2022) было исследовано влияние гроз на ситуацию с лесными пожарами в Австралии в 2017–2020 гг. с использованием данных космических наблюдений сенсора грозовой активности (Lightning Imaging Sensor, LIS), установленного на борту международной космической станции МКС (International Space Station, ISS) и пожарного сенсора MODIS. Для определения количества ландшафтных пожаров, вызванных грозами, был применен метод Географической Информационной Системы (ГИС), который состоял в комбинированном исследовании пространственного и временного распределения грозовых ударов и очагов возгорания. Была проанализирована сезонная изменчивость гроз и активности природных пожаров. В работе показано, что сезонное распределение грозовой активности не совпадает с максимумами пожарной активности. Отмечены межгодовые изменения грозовой активности, но не были обнаружены какие-либо грозовые особенности для основных типов растительности. Из 120,829 вспышек, зарегистрированных датчиком ISS LIS в период 2017–2020 гг., только 23 вспышки можно было охарактеризовать как источник стихийных природных пожаров, вызванных грозовой активностью. Таким образом, согласно данным MODIS и ISS LIS сенсоров, частота воспламенения в результате попадания молнии равна 0.00023 пожар/разряд. Отмечено, что возгорания растительности от попадания молний обычно происходили на границе грозового фронта, в полусухих районах, заросших открытым кустарником. Было зарегистрировано только два лесных пожара, которые предположительно были вызваны попаданием молниевых разрядов. Один из них произошел 01.03.2019 в эвкалиптовом массиве вблизи Мельбурна. Заметим, что в засушливый австралийский период (апрель–сентябрь) датчиком LIS ISS было зафиксировано очень мало грозовых явлений, хотя пожарная активность в этот период была достаточно высокой. Кроме этого в работе был сделан вывод о том, что влияние гроз на пожарную обстановку слишком мало, чтобы объяснить многочисленные лесные пожары в дождливый австралийский период.

### **Литература:**

1. Safronov, A.N. (2022) Spatio-Temporal Assessment of Thunderstorms' Effects on Wildfire in Australia in 2017–2020 Using Data from the ISS LIS and MODIS Space-Based Observations. // MDPI Atmosphere 2022, 13, 662. doi:10.3390/atmos13050662

## Изменчивость приземного озона в Карадагском природном заповеднике

Федорова Е.И.<sup>1</sup>, Лапченко В.А.<sup>2</sup>, Еланский Н.Ф.<sup>1</sup>, Скороход А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского — природный заповедник РАН филиал

Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Феодосия, Россия

[fedorova@ifaran.ru](mailto:fedorova@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** приземный озон, обратные траектории, сезонный ход, суточный ход, направление ветра, дальний перенос, спутниковые измерения

Проведен анализ непрерывных рядов данных приземной концентрации озона на Карадагской станции (КС) фонового экологического мониторинга за 2016–2021 гг. Измерения проводились газоанализатором АРОА-370 (HORIBA, Япония), который проходил регулярную калибровку по национальному эталону. К анализу также привлечены спутниковые данные AIRS. Для обработки орбитальной информации и статистического траекторного анализа применена программа Tropomi tools, разработанная в ИФА РАН.

Среднегодовые значения концентрации Оз лежат в пределах 63–74 мкг/м<sup>3</sup>. Ярко выражен сезонный ход: среднесезонные значения минимальны (49–54 мкг/м<sup>3</sup>) в зимние месяцы и максимальны весной и летом (71–90 мкг/м<sup>3</sup>). В некоторые годы наблюдается дополнительный максимум в июле–августе. На КС в течение 2016–2021 гг. отмечены несколько случаев превышения разовой ПДК (160 мкг/м<sup>3</sup>) и три эпизода с сохранением такой концентрации в течение нескольких часов. Максимальная среднечасовая концентрация озона, равная 195 мкг/м<sup>3</sup>, отмечена 25.08.2018.

Суточный ход имеет максимум в 14–16 ч. местного времени, наиболее выраженный летом. Дневной рост озона говорит об активной генерации в результате окисления его предшественников СО и ЛОС, чему способствуют местные условия: высокая температура воздуха и уровень УФ радиации, обусловленный значительной высотой станции, низким содержанием аэрозоля и большим числом безоблачных дней.

В работе проанализированы условия, приводящие к повышению уровня Оз, когда средняя за 8 часов концентрация превышала предельный безопасный порог 100 мкг/м<sup>3</sup>, рекомендованный ВОЗ и принятый в ЕС. Большинство таких случаев приходится на весенние и летние месяцы.

Траекторный анализ показал, что весной движение воздушных масс происходит над акваторией Черного моря со стороны Украины, Турции, Румынии и Болгарии; в летние месяцы над территорией суши и в основном со стороны Украины и южных районов России.

Исследование выполнено при поддержке Российского Научного фонда, проект №20-17-00200.

## **Анализ и прогноз переноса продуктов горения природных пожаров в Москву в августе 2022 г.**

Шалыгина И.Ю.<sup>1</sup>, Лезина Е.А.<sup>1</sup>, Кирсанов А.А.<sup>2</sup>, Ривин Г.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГПБУ «Мосэкомониторинг», Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

[irus\\_76@mail.ru](mailto:irus_76@mail.ru)

**Ключевые слова:** взвешенные частицы PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, природные пожары, качество воздуха, химическая транспортная модель, COSMO-RU-ART

Август 2022 г. стал самым жарким за всю историю метеорологических наблюдений в Москве, и вторым самым сухим. Продолжительный период сухой и жаркой погоды на большей части центральных областей России стал причиной природных пожаров. С начала августа Москва находилась под влиянием обширного малоподвижного антициклона. В середине месяца Московская городская сеть непрерывного мониторинга качества воздуха зафиксировала первый эпизод переноса продуктов горения природных пожаров в город. До конца месяца при юго-восточном переносе фиксировались многократные эпизоды повышения уровня взвешенных частиц PM<sub>10</sub> и PM<sub>2,5</sub> на станциях мониторинга из районов природных пожаров в Рязанской области.

Под влиянием переноса продуктов горения чаще всего оказывались южные и юго-восточные районы города. Прогноз переноса из районов природных пожаров проводился на основе системы COSMO-RU-ART (ФГБУ «Гидрометцентр России»). Система прогнозирования переноса продуктов горения функционирует на основе расчетов мезомасштабной численной модели атмосферы COSMO-RU и химической транспортной модели COSMO-RU-ART с усвоением спутниковых данных. Система ранее была апробирована во время природных пожаров 2010 г. в Московском регионе, и в 2019 году в Сибири [1,2].

### **Литература:**

1. Суркова Г.В., Блинов Д.В., Кирсанов А.А. и др. Моделирование распространения шлейфов воздушных загрязнений от очагов лесных пожаров с использованием химико-транспортной модели COSMO-RU7-ART. – Оптика атмосферы и океана, 2014, №1, с. 75-81
2. Kirsanov A.A., Rozinkina I.A., Rivin G.S., Zakharchenko D.I., Olchev A.V. Effect of Natural Forest Fires on Regional Weather Conditions in Siberia. // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11, №10. – P. 1133. ISSN: 2073-4433, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>

## **Роль золотого рассеянного осадочного вещества в процессах осадконакопления в Арктике и Северной Атлантике**

Шевченко В.П., Кловиткин А.А., Новигатский А.Н., Стародымова Д.П.

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

[vshevch@ocean.ru](mailto:vshevch@ocean.ru)

**Ключевые слова:** *рассеянное осадочное вещество, аэрозоли, атмосферный перенос, черный углерод, осадконакопление*

В докладе обобщены результаты исследований рассеянного осадочного вещества в атмосфере Арктики и Северной Атлантики, выполненных сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН совместно с коллегами из ряда российских и зарубежных институтов [1, 2].

Общий вклад золотой седиментации в поставку осадочного вещества в Мировой океан А.П. Лисицын определил в 1,6 млрд т в год, что близко к поступлению в пелагиаль речного осадочного вещества (за пределами маргинальных фильтров) [1]. В Северной Атлантике это актуально, учитывая вынос значительного количества осадочного вещества из аридной зоны [3].

Важным направлением исследования экосистем Арктики и Северной Атлантики является изучение распределения, состава и переноса рассеянного осадочного вещества атмосферы, так как перенос многих вредных примесей осуществляется на мельчайших (мельче 10 мкм) аэрозольных частицах (микро- и наночастицах). Данные о микро- и наночастицах атмосферы необходимы для оценки особенностей современного осадконакопления, путей переноса и накопления загрязнений, изменений климата.

На основании геохимических исследований и изучения загрязнений арктической атмосферы удалось выявить главные точечные и локальные источники загрязнений. Удалось по соотношениям элементов установить "лицо" загрязнений (включая черный углерод) из каждого источника (из крупнейших индустриальных областей), проследить конкретные траектории прохождения воздушных масс в Арктику и Северную Атлантику и связанных с ними загрязнений, места главной разгрузки воздушных масс (депоцентры), сезонный ход процессов.

Учитывая значительное обогащение золотого осадочного вещества Pb, Sb, Cd, V, можно предположить, что для этих элементов золотой путь является основным путём их поступления в донные осадки Северной Атлантики и арктических морей [2].

Таким образом, показано, что рассеянное осадочное вещество атмосферы влияет на окружающую среду и климатические изменения и играет важную роль в процессах осадконакопления.

### ***Литература:***

1. Лисицын А.П. Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. С. 1398–1439.
2. Шевченко В.П., Голобокова Л.П., Сакерин С.М. и др. Рассеянное осадочное вещество атмосферы над Баренцевым морем // Система Баренцева моря. М.: ГЕОС, 2021. С. 127–142.
3. Duce R.A., Liss P.S., Merrill J.T. et al. The atmospheric input of trace species to the World Ocean // Global Biogeochem. Cycles. 1991. V. 5. P. 193–259.

## **Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации приземного содержания метана в Арктике**

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Федорова Е.И.  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[yuryshtabkin@gmail.com](mailto:yuryshtabkin@gmail.com)

**Ключевые слова:** метан, арктика, дальний перенос, сезонные вариации, численное моделирование, загрязнение воздуха

Метан ( $\text{CH}_4$ ) является вторым по значимости парниковым газом в атмосфере после диоксида углерода,  $\text{CO}_2$ . Для Арктики, ограниченность данных по содержанию метана в приземном воздухе затрудняет проведение количественных оценок эмиссий метана от важнейших региональных антропогенных и биогенных источников. Частично указанный пробел восполняется данными долгосрочных наблюдений на арктических и субарктических станциях мониторинга. Начиная с 2005 года, по данным на всех выше перечисленных станциях наблюдается заметный рост приземной концентрации метана. Причины указанного роста остаются до конца не выяснены.

В данной работе приводятся количественные оценки возможного вклада важнейших региональных источников природных и антропогенных эмиссий метана в наблюдаемую долгосрочную изменчивость его содержания в приземном воздухе. Для анализа вариаций приземного содержания метана используются 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2021-934).

## Электричество невозмущенного атмосферного пограничного слоя средних широт

Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Галиченко С.В., Гурьев А.В., Климанова Е.В., Козьмина А.С., Прохорчук А.А.

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия  
[svga@borok.yar.ru](mailto:svga@borok.yar.ru)

**Ключевые слова:** атмосферное электричество, атмосферный пограничный слой, натурные наблюдения, атмосферные ионы, электрическая проводимость, температурная стратификация

Атмосферный пограничный слой (АПС) представляет собой важную с точки зрения фундаментальной науки и практических приложений нижнюю часть атмосферы, динамика, а также электродинамика которой определяются сложной организацией процессов в диссипативной среде с поступлением энергии от многих источников. Невозмущенные грозовой активностью и осадками области атмосферы характеризуются низкоэнергетическими электрическими процессами, для исследования которых требуется наличие развитой приборной базы и владение методами синхронных разнесенных высокочастотных измерений нескольких физических величин [1, 2]. Несмотря на низкую энергетику локальных атмосферно-электрических процессов, нелинейная динамика их взаимодействий и существование обратных энергетических каскадов приводят к состояниям с высокой объемной плотностью энергии и быстрой изменчивостью.

В докладе представлены результаты длительных обсерваторских наземных и аэростатных высотных наблюдений в АПС напряженности атмосферного электрического поля, удельной электрической проводимости воздуха, плотности атмосферного вертикального электрического тока, концентраций легких атмосферных ионов и аэрозольных частиц, определяющих электропроводность воздуха, сопутствующих метеорологических величин и параметров, характеризующих турбулентность. Приводятся статистические оценки высотного распределения асимметрии полярных электрических проводимостей, оценки электрического потенциала атмосферы по отношению к земле и электрического сопротивления столба атмосферы, ЭДС турбулентного тока, действующей в АПС. Установлено, что в зависимости от температурной стратификации в АПС формируется электрическая стратификация с неоднородным высотным распределением полярных электрических проводимостей и долгоживущими слоями объемного заряда.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025.

### **Литература:**

1. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Prokhorchuk A.A., Kozmina A.S., Guriev A.V. Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // Atmos. Res. 2021. V. 250. 105355.
2. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Kozmina A.S. Small air ion statistics near the earth's surface // Atmos. Res. 2022. V. 267. 105913.

## **Результаты наземных и высотных наблюдений объемной активности радона в атмосферном пограничном слое**

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Климанова Е.В., Афиногенов К.В., Прохорчук А.А.  
Лаборатория геофизического мониторинга ГО «Борок» ИФЗ РАН, Борок, Россия  
[klimanova@borok.yar.ru](mailto:klimanova@borok.yar.ru)

**Ключевые слова:** ионизация атмосферы, атмосферный погранслой, Объемная активность радона, аэростатные наблюдения

Инертный радиоактивный газ радон  $^{222}\text{Rn}$ , образующийся в результате распада распространенного в земной коре элемента  $^{226}\text{Ra}$ , эмигрирует в поровое пространство грунта, откуда поступает в атмосферу, распространяясь в основном в атмосферном пограничном слое. Период полураспада  $^{222}\text{Rn}$  составляет 3.82 суток, и за характерное время жизни радон может переноситься на расстояния циклонического масштаба, что в некоторых случаях позволяет использовать радон как трекер воздушных масс. Аномально быстрая изменчивость эсхалиции радона с большой амплитудой ассоциируется с разломными процессами в земной коре и может указывать на подготовку землетрясений. Испускаемые при распаде радона и его дочерних продуктов частицы высоких энергий вносят ощутимый вклад в ионизацию воздуха, влияя на его электропроводность и протекание атмосферного электрического тока, облегчая формирование каналов молниевых разрядов.

На основе измерительно-информационного комплекса ГО «Борок» ИФЗ РАН проводились длительные натурные наблюдения объемной активности (ОА) радона, сопровождаемые метеорологическими наблюдениями [1]. В летний период 2020 и 2022 годов параллельно с наземными проводились высотные наблюдения с помощью аппаратной платформы, поднимаемой привязным аэростатом до высот около 500 м [2]. В результате полевых работ были получены высотные профили ОА радона и оценена скорость его эсхалиции в атмосферу из грунта. Анализ результатов проведенных наблюдений показал влияние атмосферного переноса и ночных температурных инверсий на ОА радона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №22-17-00053).

### **Литература:**

1. Botha R., Labuschagne C., Williams A.G., Brunke E-G., Bosman G., Rossouw A., Lindsay R. Characterising fifteen years of continuous atmospheric radon activity observations at Cape Point (South Africa) // *Atm. Env.* March 2018. V. 176. P. 30–39.
2. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Prokhorchuk A.A., Kozmina A.S., Guriev A.V. Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // *Atm. Res.* 2020. V. 250, 105355.

## Эффекты аэрозольных частиц в электричестве атмосферного пограничного слоя

Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А.

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия  
[aleksandr.prokhorchuk@mail.ru](mailto:aleksandr.prokhorchuk@mail.ru)

**Ключевые слова:** атмосферное электричество, аэрозоль, ионная зарядка, турбулентный перенос, атмосферный пограничный слой, климат

Атмосферные аэрозольные системы оказывают значительное влияние на планетарную климатическую систему посредством прямого и косвенного участия в радиационном балансе Земли, формировании облачности и внутриоблачных процессах, химии атмосферы, а также распределении электрической проводимости атмосферы [1, 2]. Для установления взаимосвязей физики аэрозолей с электрическими процессами в нижней тропосфере требуется непрерывный мониторинг параметров аэрозольных частиц и атмосферного пограничного слоя (АПС), статистический анализ больших объемов данных («big data»), в том числе полученных в результате натурных наблюдений. Взаимодействие легких атмосферных ионов с аэрозольными частицами определяет динамику объемных электрических зарядов, короткопериодных вариаций электрического поля и плотности атмосферного электрического тока в АПС. Для разработки численных моделей электродинамики атмосферы актуальна информация о распределении в пространстве концентрации, размерного состава и гигроскопичности аэрозольных частиц, которые зависят от природы источников частиц, их производительности и транспортных процессов в атмосфере.

В докладе рассматривается влияние концентрации аэрозольных частиц субмикрометрового диапазона на ЭДС конвективного генератора АПС. Знак и величина указанной ЭДС определяется высотным распределением электропроводности и интенсивности турбулентного перемешивания в АПС. Приводятся результаты численного моделирования зарядки аэрозольных частиц атмосферными ионами в зависимости от функции распределения аэрозольных частиц по размерным фракциям. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025.

### **Литература:**

1. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A. Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // Boundary-Layer Meteorol. 2018. V. 167. P. 327–348.
2. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Aphinogenov K.V. Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // Atmos. Res. 2020. V. 244. 105035.

## **Экспериментальное исследование потоков тепла, влаги и парниковых газов на грядово-мочажинном комплексе болотного стационара Мухрино**

Артамонов А.Ю.,<sup>1,2</sup>, Дмитриченко А.А.<sup>2</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

<sup>3</sup>*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*  
[sailer@ifaran.ru](mailto:sailer@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** болотные экосистемы, прямые измерения потоков, энерго и газообмен, метан, углекислый газ

С целью организации комплексных наблюдений за торфяными болотами в 2009 году в средней таежной зоне Западной Сибири была открыта научно-исследовательская полевая станция "Мухрино" [Dyukarev et al., 2021a, 2021b]. Фокус исследований направлен на изучение влияния изменения климата на углеродный цикл, гидрологию и биоразнообразие болотных экосистем.

В 2015 году в репрезентативной части болота Мухрино была установлена мачта с оборудованием для получения непрерывных данных экосистемного масштаба по обмену парниковыми газами и потоками энергии [Alekseychik et al., 2017].

По результатам экспериментальных исследований изучена суточная и годовая динамика составляющих теплового баланса элементов микрорельефа грядово-мочажинного болотного комплекса. Радиационный баланс определяется состоянием подстилающей поверхности. Суммарно за год на поверхность болота поступает 1047 и 1123 МДж/м<sup>2</sup> на гряде и мочажине, соответственно. Поток в тепла в почву на мочажине в 2,7 раза больше, чем на гряде, однако он составляет всего 1.4 и 3.6% от радиационного баланса.

Турбулентным потоком от поверхности выносятся 272 и 243 МДж/м<sup>2</sup> в год (26 и 22% от Rn) на гряде и мочажине. Поток скрытого тепла на мочажине (788 МДж/м<sup>2</sup>/год) превышает поток на гряде (706 МДж/м<sup>2</sup>/год). Всего на испарение расходуется 67-70% от радиационного баланса.

Суммарное годовое испарение оценено в 304 мм, что составило 40 % от суммы осадков (507 мм). За теплый период 2022 г (май-август) выпало 172 мм или 34 % от годовой суммы осадков. Испарение за теплый период 2022 г (249 мм) вносит основной вклад (82%) в годовое испарение. Соотношение Боуэна (H/LE) было 50 и 38% для теплого периода и всего года, соответственно.

Чистый экосистемный обмен имеет явный суточный ход с отрицательными значениями потоков в дневное время. Удельный поток метана показывает два максимума в суточном ходе – в 7 ч и 18 ч местного времени (UTC +5).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-47-04408.

### **Литература:**

1. Alekseychik, P. et al. Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with eddy covariance technique in a West Siberian bog. Atmos. Chem. Phys. 2017, 17, 9333-9345.
2. Dyukarev E. et al. Hydrometeorological dataset of West Siberian boreal peatland: a 10-year record from the Mukhrino field station // Earth Syst. Sci. Data, 2021a, 13, 2595–2605.
3. Dyukarev E. et al. The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia // Land 2021b, 10(8), 824.

## **Результаты анализа продолжительности радиационных инверсий от характеристик температурной стратификации в пограничном слое атмосферы**

Баранов Н.А.<sup>1</sup>, Князев А.К.<sup>2</sup>, Миллер Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Вычислительный центр Дороницына ФИЦ ЦНЦ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область  
[ak-ldz@mail.ru](mailto:ak-ldz@mail.ru)

**Ключевые слова:** прогнозирование радиационных температурных инверсий, микроволновой радиометр, оптимизация параметров численных моделей прогноза, пограничный слой атмосферы

Температурные инверсии один из ключевых параметров, определяющих процессы накопления и рассеяния загрязнений в пограничном слое атмосферы (PBL). Сложность непрерывного мониторинга для задач контроля и прогноза качества воздуха определяется ограничением в доступности измерительных средств. Особую сложность представляет проблема получить данные по температурной стратификации в непрерывном режиме в первых сотнях метров PBL с достаточной точностью. В нашей работе для анализа мы использовали данные о радиационных температурных инверсиях, которые были измерены в центре и окрестностях города Москва одноканальными сканирующими по углу микроволновым радиометрами (МТР5). Полученные результаты полезны как для оптимизации параметризации численных моделей, так и для процедур сравнения эмпирических результатов с данными численных прогнозов. Для анализа зависимостей продолжительности радиационной инверсий по срокам суток мы использовали характеристики мощности инверсии как по высоте слоя, так и по температуре. Кроме того, проводилась оценка скорости перестроения ночного пограничного слоя в дневной конвективный слой PBL.

**Связь вторых и третьих моментов в поверхностном слое  
при различных условиях стратификации над однородным полем  
и в условиях городского ландшафта**

Барсков К.В.<sup>1</sup>, Чечин Д.Г.<sup>1</sup>, Дрозд И.Д.<sup>12</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>1</sup>, Пашкин А.Д.<sup>1</sup>, Гавриков А.В.<sup>13</sup>,  
Варенцов М.И.<sup>124</sup>, Степаненко В.М.<sup>124</sup>, Репина И.А.<sup>124</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия*

[barskovkv@gmail.com](mailto:barskovkv@gmail.com)

**Ключевые слова:** *Неоднородный ландшафт, Теория подобия Монина-Обухова, третьи моменты*

Представлены результаты многоуровневых пульсационных измерений на мачте, установленной на плоском лугу и над сложной городской местностью, состоящей из деревьев и небольших зданий. Проанализированы связи между параметром устойчивости и турбулентными статистиками. Над равнинным лугом безразмерные турбулентные моменты второго и третьего порядка подчиняются теории подобия Монина–Обухова. Моменты третьего порядка увеличиваются при увеличении неустойчивости, что свидетельствует о нелокальном турбулентном переносе теплового потока за счет конвективных движений, и в этом случае может быть применима связь между моментами третьего и второго порядка, полученная в рамках подхода «масс-флакс». В устойчивых условиях турбулентный перенос потока тепла положителен и не демонстрирует явной зависимости от устойчивости, но может быть связан с крупными вихрями, переносящими вниз тепловой поток, возникающий вблизи вершины устойчивого пограничного слоя. Такой перенос отрицательного теплового потока большими вихрями вниз делает применимым подход «масс-флакс» даже в устойчивых пограничных слоях на более высоких уровнях. Над городским ландшафтом для всех направлений ветра третий момент хорошо соответствует теоретической кривой в случаях как существенно устойчивой, так и существенно неустойчивой стратификации, но имеется большой разброс данных в условиях, близких к нейтральным. Асимметрия вертикальной составляющей скорости над городским ландшафтом отрицательна и ее величина зависит от направления ветра. На более низких уровнях стандартное отклонение вертикальной составляющей скорости увеличивается при возрастании устойчивости быстрее, чем предсказывают полуэмпирические кривые для однородного ландшафта. Над городским ландшафтом большие элементы шероховатости не влияют на эффективность подхода «масс-флакс» в конвективном пограничном слое. Кроме того, существует связь между вторым и третьим моментами даже в устойчивых пограничных слоях над неоднородным ландшафтом.

## Формирование снежно-ледяного покрова озера Стемме (о. Западный Шпицберген)

Богородский П.В.<sup>1</sup>, Борисик А.Л.<sup>1</sup>, Марченко А.В.<sup>2</sup>, Новиков А.Л.<sup>1</sup>, Ромашова К.В.<sup>1</sup>, Рыжов И.В.<sup>1</sup>,  
Сидорова О.Р.<sup>1</sup>, Фильчук К.В.<sup>1</sup>, Хаустов В.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университетский центр на Шпицбергене, Лонгйирбюэн, Норвегия

<sup>3</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

[bogorodski@aan.ru](mailto:bogorodski@aan.ru)

**Ключевые слова:** озеро, Шпицберген, снежно-ледяной покров, измерения, радиолокация, моделирование

Представлены и проанализированы результаты комплексных наблюдений образования снежно-ледяного покрова озера Стемме (о. Западный Шпицберген) зимой 2020-2021 г. Основная информация получена методом радиолокационной съёмки, вероятно, впервые использованной на плавучем льду водоёмов архипелага. С её помощью получены данные о толщине снежного покрова, конжеляционного и снежного льда, а также прогибе ледяного покрова под действием снеговой нагрузки и понижающегося уровня водоёма.

Согласно результатам расчётов с использованием варианта термодинамической модели плавающего снежно-ледяного покрова, динамика толщины слоёв снега и льда, связанных тепловым взаимодействием весьма чувствительна к их теплофизическим свойствам. Характерной особенностью ледового режима водоёма является образование снежного льда, которое приводит к формированию более мощного ледяного покрова, что нарушает характерную закономерность уменьшения толщины льда с ростом высоты снега. С уменьшением его теплопроводности начало изостатического льдообразования сдвигается на существенно более ранние сроки из-за уменьшения толщины кристаллического льда. Аналогичный эффект оказывает рост плотности льда при неизменной теплопроводности снега.

Расчёт деформации ледяного покрова с использованием модели Нортонa, учитывающей ползучее течение льда, показал, что прогиб ледяного покрова носит долговременный характер и определяется не только упругими, но и в значительной степени, вязкими свойствами льда, которые приводят к его течению. Основная деформация льда концентрируется во вдольбереговой зоне, при этом максимальное радиальное напряжение в ледяном покрове достигается вблизи береговой линии, где образуется параллельная ей круговая трещина.

Использованные, при изучении озера Стемме, методы измерений и моделирования льда могут быть применены для изучения аналогичных процессов на пресноводных мелководных водоёмах островов Шпицбергена и других арктических архипелагов в будущем.

## **Влияние снежных частиц на характеристики турбулентности в приземном слое атмосферы**

Бычкова В.И.<sup>1,3,4</sup>Мортиков Е.В.<sup>1,2,4</sup> Дебольский А.В.<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

[er-riad@mail.ru](mailto:er-riad@mail.ru)

**Ключевые слова:** *двухфазные потоки, турбулентность, устойчивый пограничный слой, перенос частиц*

Поземки и метели являются широко распространенными явлениями в заснеженных регионах. Как правило, большое количество снега может переноситься в горизонтальном направлении преобладающими ветрами. Снег, лежащий на поверхности, приходит в движение, когда скорость потока достигает некоторого критического значения, зависящего от плотности снега. Ветровой перенос снега является одним из многих проявлений двухфазных потоков. Наибольшей плотность снежных частиц наблюдается вблизи поверхности. Как следствие, возникает устойчивый градиент плотности [Hunt, J.N., 1969]. Как и в термически стратифицированных потоках, стабильный градиент плотности снижает коэффициенты вертикального турбулентного обмена [Lumley J.L., 1978]. Уменьшения турбулентности в поверхностном слое проявляется в изменении масштабов турбулентной длины. Если плотность потока представить как плотность снега (с учетом концентрации снежных частиц) и плотность «чистого» воздуха, а поток плотности как турбулентный поток тепла и поток взвешенных частиц, то можно получить новую формулировку для определения турбулентной длины Мони́на-Обухова [Wamser C. and Lykossov V.N., 1995]. На сегодняшний момент наиболее перспективным методом описания динамики взвешенных частиц в турбулентном потоке является вихреразрешающее (LES large-eddy simulation) моделирование. В данной работе мы использовали LES модель атмосферного пограничного слоя, разрабатываемая в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН [Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykossov V.N., 2019]. Было проведено несколько экспериментов, постановка которых характеризовала условия устойчивого пограничного слоя, где для описания влияния взвешенных снежных частиц на изменение турбулентности использована новая, выше описанная, формулировка для длины Мони́на-Обухова. На основе анализа результатов мы получили характерный масштаб влияния частиц на параметры устойчивости приземного слоя.

## Характерные спектры субмезомасштабных структур по данным экспериментальных наблюдений

Вазаева Н.В.<sup>1,2</sup>, Чхетиани О.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

[vazaevanv@ifaran.ru](mailto:vazaevanv@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** субмезомасштабные структуры, спектр, экстремальные события, данные наблюдений, содады

Субмезомасштабные вихревые структуры (стрики) постоянно существуют в атмосферном пограничном слое (АПС), где всегда имеется значительный вертикальный сдвиг скорости ветра. Стрики представляют собой вытянутые в направлении средней скорости ветра полосы низкой и высокой скорости движения. Причиной образования таких структур считается развитие немодальных возмущений в стратифицированном экмановском слое. Данные об их масштабах и динамических характеристиках представляют большой интерес, поскольку стрики являются важной составляющей при описании экстремальных явлений, и их необходимо учитывать в схемах параметризаций.

Субмезомасштабные структуры способны приводить к интенсификации эмиссии пыли с подстилающей поверхности: усиление выноса пыли связано с увеличением вертикальных составляющих скорости, а также градиента давления, приводящего к «расшатыванию» частиц верхнего слоя подстилающей поверхности, частичной турбулизации приземного слоя и отрыву большого количества аэрозоля. В стриках происходит до 25 % турбулентной диссипации энергии. В некоторой литературе эти структуры также называются крупномасштабной турбулентностью.

По данным доплеровского минисодара высокого разрешения в летний период 2017-2019, 2021 гг. на Цимлянской научной станции, и по результатам измерения циркулиметра на Звенигородской научной станции в 2004 г. построены спектры вертикальной и горизонтальной компонент скоростей, а также спектры спиральности. В области малых частот спектр имеет наклон, близкий  $k^{-1}$ , при увеличении частоты спектр имеет наклон, близкий к  $-5/3$ . На наличие стриков указывают данные о флуктуациях скорости и температуры в АПС, которые демонстрируют спектральные зависимости с наклоном, близким к  $k^{-1}$ , и именно с этими структурами связаны наблюдаемые в дни измерений энергетические спектры с показателем степени -1.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 22-77-00098).

## **Численное моделирование турбулентного переноса примесей в идеализированной городской среде**

Варенцов А.И.<sup>1,2,3</sup>, Глазунов А.В.<sup>1,3,4</sup>, Мортиков Е.В.<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

[aivarentsov98@gmail.com](mailto:aivarentsov98@gmail.com)

**Ключевые слова:** вихреразрешающее численное моделирование, лагранжев перенос примесей, городской пограничный слой атмосферы

На основе вихреразрешающей модели турбулентных течений в городской среде ИВМ РАН (LES, Large Eddy Simulation) разработана и реализована методология расчётов концентрации примесей, эмитируемых из точечных источников на расстояниях, превышающих размер расчётной области гидродинамической модели. В расчётах применяется лагранжев перенос трассеров в LES с использованием стохастической подсеточной модели. Расчёты проводятся над несколькими конфигурациями [1, 2] идеализированной поверхности городского типа с имитацией зданий, имеющей регулярную периодическую геометрическую структуру. Выполнены расчёты при нейтральной стратификации течения и при охлаждении поверхности (устойчивой стратификации). На основе этих расчётов проводится проверка упрощённых стохастических моделей лагранжева переноса трассеров (ЛСМ). В качестве таких моделей применены модель случайных смещений (МСС) и стохастическая модель первого порядка, основанная на решении уравнения Ланжевена (ЛСМЛ – лагранжева стохастическая модель Ланжевена).

Рассматривается перенос примесей с точечными источниками, расположенными на различном удалении от поверхности. Осреднённые по горизонтали и по времени данные LES-моделирования используются в качестве входных данных о статистических характеристиках эйлеровой скорости турбулентного течения для ЛСМ нулевого и первого порядка (МСС и ЛСМЛ). Концентрация примесей, вычисленная при помощи ЛСМ, сравнивается с результатами LES, которые полагаются эталонным решением. Выявлены возможности, преимущества и недостатки различных ЛСМ. Предполагается, что полученные результаты являются первым этапом для построения вычислительно-эффективных методов расчёта концентраций загрязняющих веществ в городском пограничном слое, в том числе методов параметрического описания пространственно-неоднородного городского слоя в моделях переноса-диффузии примесей на большие расстояния.

### **Литература:**

1. Glazunov A. V., Debolskiy A. V., Mortikov E. V. Turbulent Length Scale for Multilayer RANS Model of Urban Canopy and Its Evaluation Based on Large-Eddy Simulations // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2021. – Т. 8. – №. 4. – С. 100-116.
2. Glazunov A., Mortikov E., Debolskiy A. Studies of stable stratification effect on dynamic and thermal roughness lengths of urban-type canopy using large-eddy simulation // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2022.

## Особенности пограничного слоя атмосферы над арктическим городом по данным экспериментальных наблюдений и вихреразрешающего моделирования

Варенцов М.И.<sup>1,3</sup>, Константинов П.И.<sup>2</sup>, Репина И.А.<sup>3,1</sup>, Глазунов А.В.<sup>4,1</sup>, Самсонов Т.Е.<sup>2</sup>, Степаненко В.М.<sup>1</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>3</sup>, Дебольский А.В.<sup>1,3</sup>, Печкин А.С.<sup>5</sup>, Соромотин А.В.<sup>6</sup>, Эзау И.Н.<sup>7</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Научный центр исследования Арктики, Надым, Россия

<sup>6</sup>Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия

<sup>7</sup>Арктический университет Тромсё, Тромсё, Норвегия

[mvar91@gmail.com](mailto:mvar91@gmail.com)

**Ключевые слова:** остров тепла, пограничный слой атмосферы, климат города, микроклимат, инверсия

Работа посвящена исследованию городского пограничного слоя атмосферы в субарктическом регионе в зимних условиях на примере города Надым (ЯНАО). В ходе серии измерительных кампаний с использованием автоматических метеостанций, термодатчиков, профилемера МТР-5 и измерительного комплекса на базе квадрокоптера [1] получены сведения об интенсивности и вертикальной протяженности городского острова тепла в приземном и пограничном слоях атмосферы. Показано, что в условиях сильно устойчивой стратификации и интенсивных приземных инверсий, в городе формируется перемешанный пограничный слой со стратификацией, близкой к нейтральной, и высотой порядка 50 м. Анализ более продолжительных наблюдений сети UHIARC [2] в Надыме показал, что интенсивность приземной инверсии температуры в слое 50-100 м является одним из ключевых предикторов интенсивности острова тепла в приземном слое атмосферы.

Для объяснения выявленного феномена проведено вихреразрешающее моделирование турбулентного течения моделью ИВМ РАН [3]. Результаты моделирования подтвердили формирование в городской среде перемешанного слоя и показали, что одним из важных механизмов образования городского острова тепла у поверхности является механическое перемешивание устойчиво стратифицированной атмосферы. Это подтверждается тем, что турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) в городе по расчетам более чем в 10 раз выше, чем за его границами.

Наблюдения в Надыме поддержаны грантом РФФИ № 20-55-71004. Разработка методов анализа данных измерений на базе квадрокоптера выполнена при поддержке гранта РНФ 21-17-00249.

### Литература:

1. Varentsov M.I. et al. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric ... // IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2019. V. 231. P. 012053.
2. Konstantinov P. et al. A high density urban temperature network deployed in several cities ... // Env. Res. Lett. 2018. V. 13. № 7. P. 075007.
3. Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво-стратифицированных турбулентных течений над плоской и городской ... // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50(3). С. 271–281.

## **Статистика турбулентных электрических переменных атмосферного пограничного слоя: результаты натурных наблюдений и численного моделирования**

Галиченко С.В., Анисимов С.В., Прохорчук А.А., Климанова Е.В.  
*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия*  
[svga@borok.yar.ru](mailto:svga@borok.yar.ru)

**Ключевые слова:** атмосферное электричество, атмосферный пограничный слой, турбулентность, легкие ионы, структурные функции, скейлинг, плотность вероятности

Атмосферно-электрические наблюдения позволяют получать информацию о физических процессах с участием электрических зарядов и формируемых ими электромагнитных полей от регионального до планетарного масштаба. Для распознавания признаков событий при интерпретации результатов наблюдений и установления закономерностей требуется глубокий анализ, включающий в себя как статистическую обработку временных рядов, так и построение моделей, с помощью которых становится возможным понимание наблюдаемых явлений и связей между ними. Значительные усилия были направлены на исследование причин и характера изменчивости атмосферного электрического поля (АЭП) у земной поверхности, в результате которых обнаружена связь суточной вариации вертикальной компоненты напряженности АЭП и глобальной грозовой активности. Однако исследованию вариаций АЭП в частотном диапазоне  $10^3$ –1 Гц, связанных с турбулентностью, неоднородной проводимостью и объемными зарядами в атмосферном пограничном слое (АПС) уделено существенно меньшее внимание.

В докладе представлены результаты статистической обработки результатов натурных наблюдений короткопериодных вариаций АЭП и концентраций легких атмосферных ионов, определяющих электропроводность воздуха, а также трехмерная электродинамическая модель конвективного АПС, учитывающая ионизационные процессы, турбулентный перенос и ток проводимости [1, 2]. Сравнение статистики концентрации легких аэроионов со статистикой температурного поля показало, что последнее обладает большей перемежаемостью, проявляющейся в узости ядра и более тяжелых хвостах распределения. Также выявлено различие в характере временного расщепления корреляций турбулентных флуктуаций температуры и концентрации легких аэроионов. Статистика мгновенных разностей АЭП подчиняется устойчивому закону распределения. Исследован скейлинг структурных функций и связь показателей наклона спектров флуктуаций АЭП, объемного заряда и локального электрического потенциала атмосферы по отношению к земной поверхности.

### ***Литература:***

1. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Klimanova E.V. Statistics of variations in atmospheric electrical parameters based on a three-dimensional model and field observations // Atmos. Res. 2021. V. 259. 105660.
2. Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Kozmina A.S. Small air ion statistics near the earth's surface // Atmos. Res. 2022. V. 267. 105913.

## Улучшение параметризации устойчивого пограничного слоя атмосферы в модели INMCM5

Дебольский А.В.<sup>1,2</sup>, Мортиков Е.В.<sup>1,3</sup>, Коленникова М.А.<sup>1,4</sup>, Володин Е.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

[and.debol@srcc.msu.ru](mailto:and.debol@srcc.msu.ru)

**Ключевые слова:** *stable boundary layer, large-eddy simulation, turbulence parameterization*

Задачей данного исследования является улучшение локально-одномерной модели атмосферного пограничного слоя (АПС) для случая устойчивой стратификации.

Для валидации и оптимизации локально-одномерной модели использовались данные численных экспериментов вихреразрешающего моделирования (Large-Eddy Simulation, LES) в идеализированных постановках для умеренно-устойчивого и сильно-устойчивого пограничного слоя атмосферы [1]. В качестве объекта оптимизации были использованы константы в функций устойчивости, предложенные в [2].

Оптимизация проводилась с помощью метода роя частиц, в качестве минимизируемой функции использовалась суммарная нормированная среднеквадратичное отклонение средних профилей локально одномерной модели от данных LES.

Полученные таким образом новые функции устойчивости были протестированы в экспериментах по воспроизведению современного климата в INMCM5 [4] и показали уменьшение ошибки в приземных характеристиках относительно реанализа.

### **Литература:**

1. Beare R.J. et al. (2006) An intercomparison of large-eddy simulations of the stable boundary layer //Bound.-Layer Meteorol. 118(2), 247-272
2. Esau, I.N., & Byrkjedal, Ø. (2007). Application of a large-eddy simulation database to optimisation of first-order closures for neutral and stably stratified boundary layers //Bound.-Layer Meteorol., 125(2), 207-225
3. Volodin E.M. et al. (2017). Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 //Climate Dyn., 49(11), 3715-3734

## **Динамика высотного распределения радона в пограничном слое атмосферы: математическое и численное моделирование**

Дмитриев Э.М., Анисимов С.В.

*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия  
[skeptikxxi@mail.ru](mailto:skeptikxxi@mail.ru)*

**Ключевые слова:** *радон, атмосфера, пограничный слой, моделирование*

Атмосферный радон  $Rn^{222}$  служит одним из главных факторов, формирующих электрическое состояние атмосферного пограничного слоя (АПС). При этом вариации общего содержания радона в АПС и его высотного распределения обусловлены прежде всего изменениями атмосферной стратификации и турбулентного режима. Непосредственное наблюдение высотного распределения объемной активности радона в АПС выполнялось с использованием привязного аэростата [1]. Однако детальное исследование динамики высотных профилей радона возможно при помощи математического и численного моделирования с учетом имеющихся данных натурных наблюдений.

В первом приближении можно считать, что концентрация радона зависит только от высоты и времени, а поток радона с земной поверхности постоянен. При этом формирование высотного распределения радона в нижней атмосфере может быть описано моделями различных типов — от стохастической модели турбулентного перемешивания до простейшей модели равномерного распределения радона в АПС [2]. В данной работе рассмотрены две модели динамики радона в АПС. Модель полного перемешивания [2] предполагает мгновенное перемешивание радона в АПС до однородного состояния и отсутствие вертикального переноса радона в остаточном слое. В модели турбулентной диффузии [3] динамика высотного распределения радона в АПС и свободной атмосфере описывается уравнением диффузии.

Продемонстрирован формальный переход модели турбулентной диффузии в модель полного перемешивания при стремлении коэффициента турбулентной диффузии в АПС к бесконечности, а в свободной атмосфере — к нулю. Представлены результаты численных расчетов по обеим моделям. Проведено сравнение модельных высотных профилей объемной активности радона в АПС полученных для различных параметров моделей. Обсуждаются области применимости моделей при интерпретации данных натурных наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-17-00053) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025.

### ***Литература:***

1. Anisimov S.V. et al. Mid-latitude atmospheric boundary-layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // Atmos.Res., 2020, V.250, 105355
2. Griffiths A.D. et al. Improved mixing height monitoring through a combination of lidar and radon measurements // Atmos. Meas. Tech., 2013, V.6, P. 207–218
3. Anisimov S.V. et al. Variability of radon distribution in the atmospheric surface layer over the land of middle latitudes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019, V.231, 012006

## Биоклиматические характеристики отопительного сезона

Докукин С.А.<sup>1,2</sup>, Гинзбург А.С.<sup>1</sup>, Белова И.Н.<sup>1</sup>, Фалалеева В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[iya@ifaran.ru](mailto:iya@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** HDD, CDD, PET, биоклиматические характеристики

В современном мире качество жизни городского населения все в большей мере определяется климатическими и биометеорологическими характеристиками соответствующей урбанизированной территории. Сегодня жителей волнуют не только достоверный прогноз погоды, но и экспертная оценка их восприятия прогнозируемых погодных условий. Тепловое загрязнение атмосферы за счет антропогенных потоков тепла, играющее ключевую роль в формировании и динамике климата конкретного города, является локальным климатическим форсингом, действующим на фоне глобальных климатических изменений. Одновременно происходит процесс совершенствования систем центрального отопления, что снижает энергозатраты городского хозяйства российских городов.

Наиболее распространенными климатическими показателями потребления энергии на обогрев и охлаждение помещений являются характеристики дефицита тепла (HDD) или дефицита холода (CDD) [1,2], которые рассчитываются для определенного периода года путём суммирования абсолютных отклонений средней суточной температуры воздуха от выбранной базовой температуры.

В 2018 году авторами был создан Онлайн калькулятор [2] прикладных климатических индексов – это значение градус-суток, характеризующих потребности тепловой и электрической энергии для отопления и кондиционирования, учитывающий прогноз среднесуточной температуры по данным Росгидромета в конкретном городе на предстоящую неделю.

Созданная недавно новая база данных с координатной сеткой для биометеорологических исследований [3] содержит новый набор данных для наиболее популярных индексов теплового комфорта, а также вычисление специфических индексов комфорта. Потребность в подобной унификации данных существовала многие годы [4].

Поскольку для различных задач используют подходящие индексы, то мы предлагаем рассчитывать HDD и CDD на основе новой базы данных температур [3]. Также произведено сравнение этих индексов с расчётами по физиологически эквивалентной температуре PET.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-05-00254.

### **Литература:**

1. Гинзбург А.С., Решетарь О.А., Белова И.Н. 2016. Влияние климатических факторов на энергопотребление в отопительный сезон // Теплоэнергетика, 9, с. 20–27.
2. I N Belova et al 2018 Energy Procedia 149 373-379
3. P I Konstantinov et al 2022 Environ. Res. Lett. 17 085006
4. I N Belova et al 2020 IOP Conf. S.: Earth and Env. Sc., 606, 1, 0120072019

## **Учет термической неоднородности подстилающей поверхности при моделировании турбулентных потоков над болотными экосистемами**

Дрозд И.Д.<sup>1,2,5</sup>, Варенцов М.И.<sup>1,3,4,5</sup>, Варенцов А.И.<sup>1,4,5</sup>, Степаненко В.М.<sup>4,1,3,5</sup>, Репина И.А.<sup>5,3,4</sup>,

Чечин Д.Г.<sup>5</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>5</sup>, Пашкин А.Д.

<sup>1</sup>Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>4</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[drozdil.msu@gmail.com](mailto:drozdil.msu@gmail.com)

**Ключевые слова:** *Пограничный слой атмосферы, турбулентные потоки, болотные экосистемы, термическая неоднородность, коптерные измерения, пульсационные измерения*

В большинстве современных атмосферных моделей характеристики болотных экосистем задаются лишь одним набором параметров, что не позволяет описывать микроландшафтные особенности болот. При этом поверхность болота отличается резкой термической неоднородностью, которая может достигать 10°C в пределах нескольких метров. Возможность учитывать термическую неоднородность болотной поверхности в атмосферных моделях является важной задачей, так как значительная разница температуры поверхности существенно влияет на формирование турбулентных потоков. В данной работе дается оценка влияния термической неоднородности болотной поверхности на точность расчета потоков тепла, а также предлагается методология по ее учету для классической теории подобия Монина-Обухова (ТПМО).

Основой работы стали данные собранные в результате экспедиции ИФА РАН на полевой стационар Мухрино с 11 по 23 июня 2022 года. В рамках экспедиции были развернуты три пульсационных измерительных комплекса на мачтах, расположенных над болотными микроландшафтами, значительно различающимися по степени обводненности: рямом, грядами и топью. С помощью коптера DJI Mavic 2 Pro и ИК-камеры Flir TAU 2R проводились регулярные воздушные ИК съемки двух полигонов с гомогенной и гетерогенной поверхностью, осуществлялось вертикальное зондирование метеовеличин в погранслое и составления ортофотоплана местности.

В ходе обработки собранных данных была получена подробная температурная карта поверхности изучаемых полигонов, рассчитаны футпринты для каждой мачты и оценен вклад выделяемых микроландшафтов в формирование измеряемого потока тепла. Потоки тепла рассчитанные по ТПМО с учетом термической неоднородности поверхности и без сравнивались с потоками, полученными методом eddy covariance. В результате работы была получена оценка эффективности предложенного авторами метода учета термической неоднородности поверхности при моделировании турбулентных потоков над болотами.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-47-04408.

## **Настройка различных физических параметризаций модели WRF-ARW по измерениям характеристик инверсий температуры в планетарном пограничном слое над Москвой**

Журавлев Р.В.<sup>1</sup>, Миллер Е.А.<sup>1</sup>, Лезина Е.А.<sup>2</sup>, Родина К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область

<sup>2</sup>ГПБУ «Мосэкомониторинг», Москва, Россия

[tissary@gmail.com](mailto:tissary@gmail.com)

**Ключевые слова:** модель WRF, параметризация модели, пограничный слой атмосферы, температурная инверсия, микроволновые радиометры, вертикальный профиль температуры, прогнозирование

В данной работе была протестирована модель WRF-ARW с несколькими различными комбинациями физических параметризаций для оценки качества прогнозов параметров инверсии температуры над городом Москва. Моделирование проводилось с использованием вложенных сеток с пространственным разрешением внутренней области 2 на 2 км, горизонтом прогноза двое суток за период времени, начиная с 2018 по 2021 гг., для выбранных месяцев с частыми аномальными сутками динамики температурной стратификации: апрель, август, октябрь и декабрь. В качестве источника опорных данных использовались одноканальные микроволновые радиометры (МТР5), установленные в Подмоскowie, которые предоставляют вертикальный профиль температуры в PBL. Один МТР5 на севере Москвы использовался для настройки параметров модели, а другой на востоке Москвы - для валидации.

Для оценки качества прогнозов модели в качестве целевых метрик были выбраны следующие параметры температурных инверсий: тип инверсии, высота инверсии (разница верхней и нижней границы) и глубина/величина инверсии. Эти параметры являются важными индикаторами загрязнения воздуха или условий рассеивания в городской среде.

Результаты сравнения показывают, что для воспроизведения основных параметров инверсии можно выбрать несколько вариантов параметризации.

## **Численные эксперименты по выяснению механизма интенсификации атмосферного вихря над Баренцевым морем**

Кузнецова А.М., Поплавский Е.И., Троицкая Ю.И.  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия  
[umnyaginaam@yandex.ru](mailto:umnyaginaam@yandex.ru)

**Ключевые слова:** атмосферный вихрь, полярный ураган, Баренцево море, численное моделирование, WRF

Проведены расчеты с использованием атмосферной модели WRF, позволяющие выяснить механизм интенсификации атмосферного вихря: бароклинный сдвиг, потоки тепла на поверхности или высвобождение скрытого тепла при конденсации. Ранее такие работы проводились, например, в [1, 2]. Однако в настоящей работе был использован подход, в котором проводилось вихреразрешающее моделирование в наименьшем вложенном домене. Был исследован полярный ураган с давлением 1005 hPa и скоростями ветра более 30 м/с, проходивший над Баренцевым морем 5.02.2009 и позднее 7.02.2009. Модель применялась над Баренцевым морем с включением/отключением рассматриваемых физических процессов. В качестве контрольного использовался эксперимент, в котором были подключены все необходимые физические процессы в WRF. При отключении тепла, выделяемого при конденсации, за счет отключения вклада тепла в температурный профиль в модуле, отвечающем за микрофизику облаков, изучалась роль скрытого тепла. Для оценки чувствительности к потокам тепла на поверхности проводился численный эксперимент с их отключением. Для выявления роли бароклинного сдвига отключались и потоки тепла на поверхности, и высвобождение скрытого тепла при конденсации. При подключении параметризаций всех процессов, описанных в WRF, под действием данных реанализа ветра формируется вихрь с высокими скоростями ветра и ярко выраженным «глазом» полярного урагана. При отключении тепла, выделяемого при конденсации, вихрь не формируется, однако высокие значения скорости ветра расположены в области, где должен образовываться вихрь. При отключении потоков тепла на поверхности вихрь также не формируется и высокие значения скорости ветра смещаются, что не соответствует данным о полярной депрессии, полученным в контрольном эксперименте. При этом роль бароклинного сдвига не представляется определяющей: вихрь в случае оценки чувствительности к данному процессу также не формируется. Работа поддержана грантом президента МК-2489.2022.1.5.

### **Литература:**

1. Føre, Ivan et al. A ‘hurricane-like’ polar low fuelled by sensible heat flux: high-resolution numerical simulations. Q.J. of the R Met. Society (2012):1308-1324
2. Дианский, Н.А и др. Исследование отклика верхнего слоя Баренцева моря на прохождение интенсивного полярного циклона в начале января 1975 года. М. гидрофиз. ж. (2019):530-549
3. Яровая, Д.А., В.В.Ефимов. Численные эксперименты по чувствительности полярного мезоциклона над Баренцевым морем к источникам тепла. М. гидрофиз. ж. (2020):243-260

## Статистическое распределение атмосферных пыльных вихрей на Земле и на Марсе

Курганский М.В.

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

[kurgansk@ifaran.ru](mailto:kurgansk@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** конвективные вихри, пыльные вихри, марсианская атмосфера, принцип максимума энтропии, масштаб длины Обухова

Рассмотрены теоретические основы экспоненциальной и степенной аналитических формулировок распределения конвективных вихрей (включая пыльные вихри) по их размерам и интенсивности. Общие статистические аргументы Джейнса, основанные на принципе максимума энтропии Шеннона, приводящие к экспоненциальному распределению, дополнены принципом максимальной энтропии Реньи, который, как показано, приводит к степенному закону распределения. В обоих случаях ключевым элементом теории является априорное знание конечного первого момента распределения. Обсуждаются приложения к статистике конвективных вихрей, в том числе пыльных вихрей, на Земле и на Марсе. Существование конечного среднего значения диаметра вихря, связанного с абсолютным значением масштаба длины Обухова в пограничном слое атмосферы позволяет количественно объяснить всплеск конвективной вихревой активности, наблюдаемый на месте посадки аппарата InSight осенью Северного полушария на Марсе.

## **Ветровой режим над Москвой по многолетним данным акустического зондирования атмосферы**

Локощенко М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[loko@geogr.msu.ru](mailto:loko@geogr.msu.ru)

**Ключевые слова:** *скорость и направление ветра, акустическое зондирование, доплеровский содар, многолетние изменения, высота обращения, параметр шероховатости, слой Экмана*

Обсуждаются закономерности ветрового режима в нижнем 500-метровом слое воздуха над Москвой по многолетним (с 2004 г.) данным акустического зондирования атмосферы доплеровским содаром MODOS (МЕТЕК, Германия) в Метеорологической обсерватории МГУ. Годовой ход скорости ветра  $V$  отмечен максимумом в холодное время года и минимумом летом. Наибольшая  $V$  в среднем за 10 мин в слое до 500 м составляет  $30 \div 35$  м/с – как правило, на периферии глубоких и обширных циклонов. Суточный ход  $V$  ниже  $40 \div 60$  м отмечен дневным максимумом и ночным минимумом; от 80 до 120 м выражен слабо и характеризуется утренним минимумом; начиная с высоты  $140 \div 160$  м – дневным минимумом и ночным максимумом. Переходная зона  $80 \div 120$  м приблизительно соответствует высоте обращения, не имеющей чётко выраженных границ. Утренний минимум на высотах  $120 \div 140$  м является летом статистически достоверным явлением и предположительно связан с частыми приподнятыми инверсиями на данных высотах. Параметр шероховатости в условиях разреженной городской застройки с высотой зданий до 250 м в среднем составляет  $\sim 5$  м. За последние 15 лет не выявлено статистически значимых изменений  $V$ . Преобладающими направлениями ветра в Москве в слое от 40 до 500 м являются западно-юго-западное и юго-западное; летом в нём усиливается западная составляющая. Правый поворот в слое Экмана вплоть до высоты 500 м составляет в условиях Москвы в среднем  $20^\circ$

### **Литература:**

1. Локощенко М.А. О ветровом режиме нижней атмосферы над Москвой по данным многолетнего акустического зондирования. // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 19-31.
2. Локощенко М.А. Направление ветра в Москве. // Метеорология и гидрология, 2015, № 10, стр.5-15.

## Автоматическое определение высоты слоя перемешивания по данным содарного зондирования

Люлюкин В.С.<sup>1,2</sup>, Семенов Е.А.<sup>1,2</sup>, Ракитин В.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

[lyulyukin@ifaran.ru](mailto:lyulyukin@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** атмосферный пограничный слой, содар, высота слоя перемешивания, автоматизация обработки данных

Высота слоя перемешивания (ВСП) является важным параметром при прогнозе распространения как первичных, так и вторичных примесей в атмосферном пограничном слое (АПС). Для адекватного моделирования процессов переноса, необходим непрерывный мониторинг ВСП, особенно при расчётах загрязнений в районах городской застройки [Schäfer et al. 2006]. Наиболее перспективными инструментами для обеспечения непрерывных рядов измерений ВСП являются средства дистанционного зондирования.

Содары измерения предоставляют данные о вертикальном распределении интенсивности температурных флуктуаций, скорости и направления ветра и дисперсии вертикальной скорости [Kouznetsov 2009]. Этот на данные могут быть использованы вместе для оценки высоты слоя перемешивания [Beyrich 1997]. В данной работе представлен алгоритм автоматической обработки данных содарного зондирования, представлены данные о ВСП для долгосрочных круглогодичных измерений в Московском регионе. Проведены сопоставления полученных значений с расчётами ВСП по данным температурного профилемера и с данными реанализа.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 21-17-00021.

### **Литература:**

1. Schäfer K. et al. Influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban areas // Meteorol. Z. – 2006 – Т.15. – №12. – С. 647-658.
2. Kouznetsov R. D. The multi-frequency sodar with high temporal resolution // Meteorologische Zeitschrift. – 2009. – Т. 18. – №. 2. – С. 169.
3. Beyrich F. Mixing height estimation from sodar data—a critical discussion // Atmospheric Environment. – 1997. – Т. 31. – №. 23. – С. 3941-3953.

## **Сопоставление методов оценки высоты слоя перемешивания в условиях устойчивой стратификации по данным локальных и дистанционных измерений параметров атмосферы**

Люлюкин В.С.<sup>1,2</sup>, Чечин Д.Г.<sup>1</sup>, Варенцов М.И.<sup>1,3</sup>, Семенов Е.А.<sup>1,2</sup>, Зайцева Д.В.<sup>1</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>1</sup>, Кузнецов Д.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия*  
[lyulyukin@gmail.com](mailto:lyulyukin@gmail.com)

**Ключевые слова:** атмосферный пограничный слой, устойчивая стратификация, содар, беспилотные летательные аппараты

Одним из ключевых параметров для численных климатических и транспортных моделей является высота слоя перемешивания (ВСП) [Schäfer et al. 2006]. Данный параметр не измеряется напрямую, а его оценки на основе измеряемых метеорологических величин зачастую неоднозначны. Наибольшие ошибки в определении ВСП возникают в условиях устойчивой стратификации, когда данная величина может принимать значения от единиц до сотен метров [Sun et al. 2021].

В работе были сопоставлены методы экспериментальной оценки высоты слоя перемешивания в ночное время на основе данных экспедиционных измерений, проведенных на Цимлянкой научной станции летом 2020 года. Использовались данные как дистанционных, так и локальных измерений параметров атмосферы. Дистанционные измерения профилей температуры, скорости ветра и интенсивности турбулентных флуктуаций были обеспечены температурным радиометром и трехантенным доплеровским содаром. Локальные измерения обеспечивались автоматическими метеостанциями и ультразвуковыми термометрами-анемометрами на метеорологических мачтах, а также компактными метеодатчиками, размещенными на квадрокоптере.

ВСП рассчитывалась на основе значений метеорологических величин в приземном слое и из вертикальных профилей параметров устойчивости [Vicker and Mahrt 2004]. Оценки ВСП, полученные различными методами, были сопоставлены с фактической структурой турбулентности, наблюдаемой на содарных эхограммах. Показаны особенности определения слоя перемешивания при учете взаимодействия приземной турбулентности и струйного течения и в эпизодах наблюдения сложной турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя, являющейся следствием взаимодействия натекающего потока с водной поверхностью.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта 21-17-00021.

### **Литература:**

1. Schäfer K. et al. Influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban areas // *Meteorol. Z.* – 2006 – Т.15. – №12. – С. 647-658.
2. Sun H. et al. Evaluation of a Method for Calculating the Height of the Stable Boundary Layer Based on Wind Profile Lidar and Turbulent Fluxes // *Remote Sensing* – 2021 – Т.13. – №18. – С. 3596.
3. Vickers D., Mahrt L. Evaluating formulations of stable boundary layer height // *Journal of applied meteorology* – 2004 – Т.43. – №11. – С. 1736-1749.

## **Процессы энергообмена подстилающей поверхности с атмосферой и динамика протаивания верхнего слоя многолетней мерзлоты на о. Большевик в 2016 – 2021 гг.**

Макшtas А.П., Богородский П.В., Махотина И.А., Ежиков И.С.

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*  
[maksh@aari.ru](mailto:maksh@aari.ru)

**Ключевые слова:** энергообмен, радиационный баланс, параметризация, глубина протаивания

Исследования деятельного слоя грунта на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» были начаты в феврале 2016 г. после развертывания комплекса аппаратуры ФМИ для измерений характеристик грунтов. По результатам измерений был выявлен годовой цикл изменений температуры почвы, отчетливо проявляющийся вплоть до глубины 1 метр. При этом амплитуда годового цикла температур в почве на 10 – 15 °C меньше амплитуды годового цикла температуры приземного слоя воздуха  $T_a$  и особенно температуры поверхности почвы  $T_{\text{rad}}$ , которая в значительной степени обусловлена процессами радиационного прогрева приходящей коротковолновой радиацией и выхолаживания длинноволновым излучением. Линейная аппроксимация данных выявила увеличение  $T_a$  порядка 0.4 °C/год,  $T_{\text{rad}}$  – 0.3 °C/год, температур деятельного слоя грунта – 0.2 °C/год. Данные о термическом режиме деятельного слоя грунта и характеристиках энергообмена позволили сделать предварительное заключение о причинах аномально теплого состояния верхнего метрового слоя грунта летом 2020 года. Сопоставление временных ходов температур подстилающей поверхности и характеристик энергообмена показало, что в 2020 году температура поверхности грунта в конце мая на короткое время достигла температуры таяния снега. Это произошло на 15 - 25 дней раньше, чем в другие годы, и привело к радикальному уменьшению альбедо, резкому увеличению притока тепла к подстилающей поверхности и продолжительности периода прогрева деятельного слоя грунта.

Анализ данных о пространственно – временной изменчивости сезонного протаивания почво-грунтов, полученных на полигоне, организованном на о. Большевик по стандартам CALM, выполненный с помощью варианта термодинамической модели Лейбензона для различных параметризаций свойств растительности и грунта арктических пустынь, показал сильную зависимость рассчитанной глубины протаивания от высоты и влажности растительности, вариации которых являются возможной причиной пространственной изменчивости глубины протаивания, зафиксированной на полигоне.

## **Воздействие ветрового волнения на перемешивание в верхнем слое океана в Арктике в современном климате**

Маркина М.Ю., Шармар В.Д.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*  
[markina@sail.msk.ru](mailto:markina@sail.msk.ru)

**Ключевые слова:** ветровое волнение, турбулентное перемешивание, Арктика

Уменьшение площади ледового покрова в Арктике в последние десятилетия приводит к усилению интенсивности взаимодействия между океаном и атмосферой. На освобождающихся ото льда акваториях это может приводить к усилению ветрового перемешивания в верхнем слое океана. Помимо этого, в связи с освобождением ото льда большой площади акваторий, происходит усиление активности ветрового волнения. Ветровые волны также оказывают влияние на перемешивание в верхнем слое океана и в частности важны для формирования циркуляции Ленгмюра, влияние которой может распространяться на верхние десятки метров. В данной работе в качестве характеристики воздействия волн на перемешивание мы используем турбулентное число Ленгмюра, которое характеризует относительное влияние вертикального сдвига скорости течений и Стоксова дрейфа, связанного с ветровыми волнами, на турбулентность в верхнем пограничном слое океана. Мы рассматриваем сезонную изменчивость воздействия волн на перемешивание в Арктике, а также на межгодовую изменчивость данной характеристики в современном климате (1980-2020 гг.), а также обсуждаем различия в воздействии волн на характеристики в верхнем слое океана в наиболее многолетние и малолетные годы в течение рассматриваемого периода.

## Экспериментальные исследования формирования когерентных структур в городском каньоне в различные сезоны

Пашкин А.Д.<sup>1</sup>, Репина И.А.<sup>1,2</sup>, Степаненко В.М.<sup>1,2,3</sup>, Богомолов В.Ю.<sup>2,5,1</sup>, Смирнов С.В.<sup>4,1</sup>,  
Тельминов А.Е.<sup>4,1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>3</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

[artem.ifa64@gmail.com](mailto:artem.ifa64@gmail.com)

**Ключевые слова:** турбулентность, неоднородная поверхность, городской каньон, статистические моменты, когерентные структуры

В докладе представлена усовершенствованная схема эксперимента, описанного в [1]. Измерительная площадка находится в условиях, подобных городскому каньону. Измерения проводятся на базе геофизической обсерватории Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск) с использованием измерительной системы из 5 акустических анемометров АМК-03 совместного производства ИМКЭС СО РАН и ООО "Сибаналитприбор" (Россия).

Для описания когерентных структур в атмосферном пограничном слое используется подход, предложенный в работах [2,3] с параметризацией потока потока потенциальной температуры по типу конвективной адвекции. Исследуется связь третьих моментов вертикальной скорости ветра и потенциальной температуры с потоком потенциальной температуры и, соответственно, с вертикальным потоком явного тепла через коэффициент асимметрии распределения вертикальной скорости и безразмерную константу  $C_w$ .

Анализируются периоды с преобладанием устойчивой стратификации зимой и периоды с преобладанием неустойчивой стратификации летом для определённого направления воздушного потока, обтекающего каньон. Рассматривается различие турбулентных характеристик при различных значениях термической шероховатости в каньоне.

По данным за январь и июль 2022 года значения коэффициента наклона  $C_w$  летом на разных высотах при натекающем потоке с открытой стороны каньона близки друг к другу (среднее значение  $2,46 \pm 0,14$ ), а зимой значительно отличаются (среднее значение  $1,17 \pm 0,32$ ). Значение коэффициента  $C_w$  порядка единицы, что позволяет говорить о применимости формулы связи вторых и третьих моментов для зимних и летних условий в городском каньоне.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ 21-17-00249, подготовка измерительной аппаратуры проведена при поддержке проектов № IX.138.2.3 и № 121031300154-1 (государственные задания ИМКЭС СО РАН).

### Литература:

1. Пашкин А.Д. и др. Связь статистических характеристик турбулентности с когерентными структурами... // Процессы в геосредах. 2021 № 1 (27). С. 1020–1027.
2. Zilitinkevich S.S. et al. Third-Order Transport and Nonlocal Turbulence Closures for Convective Boundary Layers // J. Atm. Sci. 1999. V. 56. pp. 3463–3477.
3. Mironov D.V. et al. Comments on "a new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer" // J. Atm. Sci. 1999. V. 56 (19). pp. 3478–3481.

## **Отклик верхнего слоя океана на прохождение тропических циклонов. Наблюдения и моделирование**

**Пиваев П.Д.<sup>1,2</sup>, Кудрявцев В.Н.<sup>1,2</sup>, Reul .N.<sup>3</sup>, Chapron B.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

<sup>2</sup>*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Brest, France*

[pivaev.pavel@gmail.com](mailto:pivaev.pavel@gmail.com)

**Ключевые слова:** *тропические циклоны, перемешанный слой, спутниковые измерения, аномалия температуры, аномалия солености*

Тропические циклоны, распространяющиеся над океанами, существенно влияют на термодинамику верхних слоев океана. Температура поверхности океана, соленость и аномалии смещений поверхности в следах, наблюдаемых за движущимися тропическими циклонами, могут зависеть от множества различных параметров. Отклик температуры верхнего слоя океана на прохождение тропических циклонов может оказывать сильное влияние на динамику самих циклонов, так как охлаждение перемешанного слоя обычно препятствует интенсификации ураганов. Учет аномалий солености также свидетельствует об улучшении статистического прогноза быстрой интенсификации циклонов. Таким образом, более глубокое понимание реакции верхнего слоя океана на прохождение тропических циклонов имеет важное значение для лучшей оценки термодинамики океана в экстремальных условиях, а также для улучшения прогнозов, связанных с тропическими циклонами.

С давних пор предлагалось много моделей отклика верхнего слоя океана, но в основном для сравнения использовались локальные данные *in situ*. В настоящем исследовании рассматриваются спутниковые данные с большой полосой обзора вместе с упрощенной моделью отклика верхнего слоя океана для изучения выбранных и хорошо задокументированных случаев термохалинного отклика океана на прохождение интенсивных тропических циклонов. Были получены параметризации аномалий температуры и солености в автомоделных переменных. Отклонение параметризаций от ожидаемых зависимостей обсуждается.

Данная работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проектов № 21-17-00236 и №. 21-47-00038 и государственных заданий №. 0555-2021-0004 в МГИ РАН и №. 0763-2020-0005 в РГГМУ.

## **Применение ИК-термографии и импульсного нагрева CO<sub>2</sub> лазером поверхности раздела «жидкость-газ» для определения её свойств**

Плаксына Ю.Ю., Пуштаев А.В., Захаров К.Н., Руденко Ю.К., Винниченко Н.А., Уваров А.В.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

[yuplaksina@mail.ru](mailto:yuplaksina@mail.ru)

**Ключевые слова:** ИК-термография, импульсный нагрев поверхности, слабая пленка, пограничный «жидкость-газ»

Проведенные ранее нами исследования показали, что в зависимости от типа жидкости и состояния её поверхности на ней могут возникать различные граничные условия [1,2]. Эти граничные условия определяются отсутствием или наличием тонкой поверхностной пленки. Опыты показывают, что некоторые жидкости (этанол, силиконовое масло и др.) пленок не образуют, они удовлетворяют стандартным условиям проскальзывания, используются при исследованиях поверхностной термокапиллярной конвекции и т.д. В воде (кроме деионизированной) всегда присутствует плёнка, которая препятствует массообмену «поверхность-объём» и является одной из причин образования так называемой «холодной плёнки». Но в геофизике холодная пленка связывается исключительно с процессом теплообмена, в то время как она сильно влияет и на структуру приповерхностных течений. Хорошо известно, что под воздействием ветра холодная пленка может рваться. В работе показано, что сильный поверхностный локальный нагрев приводит к разрывам пленки и расплыванию теплового пятна и по этим параметрам, фиксируемым тепловизором, можно определять свойства такой пленки. Очевидно, что в стандартных «сильных» пленках такой нагрев приведет к простому нагреву (или выжиганию) участка поверхности.

В данной работе исследовались условия разрыва и восстановления плёнки в дистиллированной воде и воде с растворимыми и нерастворимыми примесями в ветровых каналах с разной геометрией под действием обдува с разной мощностью и импульсного нагрева с помощью CO<sub>2</sub> – лазера (10,6 мкм). Структура поля температур определялась ИК-тепловизором FLIR 7700. Исследования показали, что даже малые концентрации примесей могут оказывать существенное влияние на граничные условия на поверхности жидкости.

Работа была выполнена с использованием оборудования, приобретённого за счёт средств Программы развития Московского университета.

### ***Литература:***

1. Vinnichenko N.A., Pushtae A.V., Plaksina Yu.Yu. et. al. // Int. J. Heat Mass Transf. -2018.- vol. 126 – p. 400-410.
2. Rudenko Yu. Yu., Vinnichenko N.A., Plaksina Yu.Yu. et. al. // J. Fluid Mech. -2022.- vol. 944 - A35,- 23p.

## **Анализ динамики составляющих радиационного баланса у подстилающей поверхности по данным актинометрической сети РФ**

**Плахина И.Н.<sup>1</sup>, Репина И.А.<sup>1</sup>, Махоткин А.Н.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия*

[inna@ifaran.ru](mailto:inna@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** *приземный слой, прозрачность атмосферы, климат, радиация, баланс, тенденции изменений, солнечная, коротковолновая, длинноволновая радиация*

На фоне происходящих климатических изменений прослеживается изменение составляющих радиационного баланса у поверхности Земли, в первую очередь, коротковолновой солнечной радиации, при этом растет интерес к рассмотрению междекадных колебаний отдельных видов радиации. В этой связи в работе на основе данных актинометрической сети РФ проанализированы изменения прямой солнечной радиации при ясном небе и суммарной радиации в условиях облачности в первые два десятилетия XXI века: для отдельных пунктов наблюдений (в разных регионах) дана оценка динамики характеристик прозрачности атмосферы -- фактора мутности (T2) и аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ). Показано, что в первые два десятилетия XXI века на всей территории РФ временная тенденция к уменьшению интегральной и аэрозольной мутности атмосферы сохраняется, пространственные особенности ее распределения (увеличение прозрачности с юго-запада на северо-восток) остаются без изменений.

Получаемые с 2014 г. на модернизированной актинометрической сети Роскомгидромета данные о длинноволновом излучении атмосферы и подстилающей поверхности использовались для оценки эмпирических зависимостей этих компонент от определяющих атмосферных параметров (температуры воздуха и почвы, влагосодержания воздуха в приземном слое, степени покрытия небосвода облаками). Для отдельных станций получены уникальные раздельные значения приходящей и уходящей длинноволновой радиации в приземном слое атмосферы, определены пределы их изменений, особенности годового и суточного хода, установлены их корреляционные связи с определяющими их параметрами атмосферы. По мере накопления данные наблюдений за длинноволновой радиацией могут быть использованы в качестве опорной базы для тестирования расчетов, построения моделей радиационного баланса пограничного слоя атмосферы и его динамики.

## Структура и динамика атмосферного пограничного слоя в прибрежной зоне

Репина И.А.<sup>1,2</sup>, Пашкин А.В.<sup>1</sup>, Барсков К.В.<sup>1</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

[repina@ifaran.ru](mailto:repina@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** Атмосферный пограничный слой, прибрежные зоны, неоднородный рельеф, атмосферная турбулентность, турбулентные потоки тепла и импульса, параметр шероховатости

В современных методах определения характеристик турбулентного обмена между поверхностью Земли и атмосферой используются теории, базирующиеся на гипотезе статистической стационарности и однородности турбулентного потока. 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 и турбулентных потоков. Затруднения применимости ТПО над неоднородными ландшафтами связано, прежде всего, с тем, что к локальному турбулентному перемешиванию, вызванному высокочастотной турбулентностью, здесь добавляются нелокальные процессы, вызванные неоднородностью генерации турбулентных движений и различными мезомасштабными циркуляциями. Особенно это актуально для прибрежных районов со сложным береговым рельефом, где структура пограничного слоя зависит от рельефа и элементов шероховатости поверхности прибрежного района суши, скорости ветра, расстояния от берега, стратификации и динамических процессов в пограничном слое атмосферы. В докладе представлены результаты исследования физических механизмов формирования структуры атмосферной турбулентности в прибрежной зоне и разработка параметризаций для расчета характеристик энерго- и массообмена между атмосферой и морем/сушей в условиях неоднородного рельефа. Представлены результаты измерений в прибрежной зоне Черного моря с использованием нескольких измерительных мачт на разном удалении от берега и измерений на морской платформе. Результаты исследования дают возможность модификации теории подобия Монина-Обухова над неоднородным рельефом с включением в функции подобия новых независимых безразмерных групп или введением новых эмпирических масштабов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-05-00834 и гранта РНФ 21-17-00249.

## **Термодинамическая эволюция толщины припайного льда в прибрежной зоне пролива Шокальского зимой 2020-2021 г.**

Сидорова О.Р., Меркулов В.А., Ризе Д.Д., Богородский П.В.

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*  
[olsid@aari.ru](mailto:olsid@aari.ru)

**Ключевые слова:** *море Лаптевых, припайный лёд, снежный покров, наблюдения, моделирование*

Рассматриваются результаты детальных ледовых и гидрологических наблюдений, выполненных зимой 2020 – 2021 гг. для исследования формирования и эволюции припайного льда в малоизученном районе побережья пролива Шокальского (арх. Северная Земля). Повышенное внимание уделено инфильтрационному (изостатическому) льдообразованию, для выяснения возможности которого предложена квазиодномерная термодинамическая модель во фронтальной постановке, использующая, в качестве входных параметров, только данные стандартных метеонаблюдений. В отличие от большинства аналогов, в ней учитываются изменения теплофизических свойств снежного слоя в зависимости от интенсивности выпадения и плотности свежего снега и его уплотнения на льду. Данные моделирования дополнены результатами расчётов толщины льда по полуэмпирической формуле 30-х гг. прошлого столетия на основе суммы градусо-дней мороза, показавших хорошее соответствие данным прямых наблюдений. Показано, что рост припая на открытых участках акватории происходит преимущественно в результате конгеляционного льдообразования. При этом возможность изостатического льдообразования, наблюдаемого в прибрежной зоне пролива Шокальского за счёт метелевого переноса и аккумуляции снега вблизи препятствий (берега, гряд торосов, обломков айсбергов) на открытых участках ледяного покрова в гидрометеорологических условиях зимы 2020 – 2021 гг. маловероятна.

## Влияние крупно- и мелкомасштабных структур на турбулентную динамику вечернего перехода атмосферного пограничного слоя

Ткаченко Е.В.<sup>1,2</sup>, Дебольский А.В.<sup>1,2,3</sup>, Мортиков Е.В.<sup>1,2,4</sup>, Глазунов А.В.<sup>4,1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия

[evtkachenko@hotmail.com](mailto:evtkachenko@hotmail.com)

**Ключевые слова:** вихреразрешающее моделирование, вечерний переход, турбулентность, атмосферный пограничный слой

Одной из задач исследования влияния суточного хода на атмосферный пограничный слой (АПС) является выявление основных механизмов, обуславливающих нестационарную динамику турбулентности. Это необходимо для улучшения воспроизведения АПС в существующих моделях прогноза погоды и климата посредством уточнения турбулентных замыканий. В рамках данного исследования рассматривается вечерний переход, характеризующийся сменой дневного конвективного пограничного слоя (ПС) на ночной устойчивый ПС, в ходе которого имеет место затухание кинетической энергии турбулентности (КЭТ). Ранее [1] было показано, что результатом уточнения параметризаций с учетом турбулентной динамики, наблюдаемой в данных вихреразрешающего моделирования (Large-Eddy Simulation, LES) является более точное воспроизведение подобной динамики в одномерной модели RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), использующей замыкание , однако формализация подобных уточнений требует дальнейших исследований.

В данной работе проводится изучение вклада крупных и мелких вихрей в общую динамику КЭТ в процессе вечернего перехода, а также сравнение динамики КЭТ при моделировании с использованием LES и RANS. Было показано, что наибольший вклад в общую энергию вносят крупные вихри, в то же время динамика КЭТ в экспериментах RANS подобна наблюдаемой в малых вихревых структурах. Также были проведены эксперименты, где КЭТ в крупных либо мелких модах подавлялась в начале вечернего перехода, результаты которых показали, что отфильтрованная энергия восстанавливается приблизительно за 1 характерный конвективный масштаб времени. Полученные результаты демонстрируют неоднородность динамики КЭТ в крупных и мелких вихревых структурах, которая может иметь значительное влияние на общую динамику КЭТ и должна быть учтена при уточнении турбулентных замыканий АПС.

### Литература:

1. Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В. Вихреразрешающее моделирование и исследование параметризаций затухающей турбулентности в вечернем переходе атмосферного пограничного слоя // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - М : Наука, 2022. - Т. 58. - №3. - С. 263-281.

## **Расчет антропогенного потока тепла на основе трехмерной модели зданий Санкт-Петербурга**

Фролькис В.А.<sup>1,2,3</sup>, Гинзбург А.С.<sup>4</sup>, Евсиков И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[vfrolkis@gmail.com](mailto:vfrolkis@gmail.com)

**Ключевые слова:** антропогенный поток тепла, городской покрывающий слой, энергопотребление городского хозяйства, теплофизические свойства зданий

Антропогенный поток тепла (АПТ), обусловленный поддержанием комфортабельных условий в городских зданиях, приводит к появлению городского острова тепла, который в течение отопительного периода обеспечивает увеличение температуры в городском покрывающем слое.

Используя веб-картографическую платформу «OpenStreetMap», Технично-экономические паспорта многоквартирных домов и информацию с сайта Яндекс.Карты, построена трехмерная модель зданий Санкт-Петербурга, которая используется для оценки АПТ.

Рассматриваются два алгоритма расчета АПТ. Первый строится на понятии «градусо-сутки отопительного периода» и «нормативном сопротивлении теплопередаче ограждающих конструкций» [1], а второй использует «Нормируемую (базовая) удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания» [2]. Расчеты базируются на СП 131.13330.2012 (Строительная климатология), СП 50.13330.2012 (Тепловая защита зданий) и ГОСТ 30494-2011 (Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях). Реализованные алгоритмы (скрипты) являются универсальными и могут быть применены для любого мегаполиса.

У каждого из представленных подходов есть свои плюсы и минусы. Первый алгоритм позволяет варьировать строительные материалы ограждающих конструкций зданий, что в конечном итоге может быть полезным в экономических и экологических расчетах. С другой стороны, в отличие от второго, первый алгоритм не учитывает вентиляцию здания, а это по разным источникам около 20% всех теплопотерь.

Оценки показывают, что в Санкт-Петербурге при разности  $\Delta T$  между температурой внутреннего и наружного воздуха в  $1^\circ\text{C}$  средняя плотность АПТ составляет  $0.92 \text{ Вт/м}^2$  при стандартном отклонении  $0.27 \text{ Вт/м}^2$ , при этом полный АПТ по городу оценивается в  $303 \cdot 106 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$ , при  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$  плотность АПТ равна  $27.7 \text{ Вт/м}^2$ , а полный АПТ –  $9.090 \cdot 109 \text{ Вт}$ .

Приводится сравнение полученных оценок с результатами численного моделирования с помощью модели COSMO-CLM.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-05-00254.

### **Литература:**

1. Гинзбург А.С., Евсиков И.А., Фролькис В.А. Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 5. С. 526-538. DOI 10.31857/S0002351521050060.
2. Фролькис В.А., Евсиков И.А. Расчет антропогенного потока тепла за период отопительного сезона в мегаполисе (на примере Санкт-Петербурга) // ENVIROMIS 2022. С. 395-398.

## **Исследование пространственной изменчивости характеристик тепло-, влаго- и газообмена над неоднородным болотным ландшафтом в Западной Сибири**

Чечин Д.Г.<sup>1</sup>, Репина И.А.<sup>1</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>2</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>1</sup>, Пашкин А.Д.<sup>1</sup>, Степаненко В.М.<sup>3</sup>, Варенцов М.А.<sup>3</sup>, Дрозд И.Д.<sup>4</sup>, Казанцев В.С.<sup>4</sup>, Ларина А.В.<sup>5</sup>, Шмонин К.Н.<sup>5</sup>, Бычкова В.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

<sup>4</sup>Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>5</sup>Факультет почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

[chechin@ifaran.ru](mailto:chechin@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** эмиссии парниковых газов, болотные ландшафты, турбулентный обмен

Существует большая неопределенность оценок эмиссий и стоков парниковых газов над болотами. Эта неопределенность связана как с недостаточным количеством данных наблюдений, так и с большой пространственной изменчивостью эмиссий и недостатками различных методик измерений. С этим также связаны сложности совершенствования и верификации численных моделей болот и углеродного цикла, использующихся в моделях климатической системы.

С целью оценить пространственную изменчивость потоков тепла, влаги и метана, а также с целью сопоставить различные методы оценок эмиссии и расчетов потоков были проведены полевые экспедиционные исследования на болотном стационаре Мухрино в районе Ханты-Мансийска в июне 2022 года. В частности, над тремя различными типами болотных субландшафтов (мочажина, грядово-мочажинный комплекс и рям) были организованы пульсационные измерения, которые были использованы для расчета потоков тепла, влаги, метана и углекислого газа методом турбулентных ковариаций. Одновременно проводились измерения эмиссий метана с помощью камерного метода. Для оценки пространственно-временной изменчивости температуры поверхности проводилась тепловизионная съемка с помощью квадрокоптера. Стратификация атмосферы и высота пограничного слоя атмосферы определялись как по данным температурного профилимера, так и по результатам зондирования с помощью квадрокоптера.

В докладе представлены количественные оценки пространственной изменчивости температуры поверхности, потоков тепла, влаги, углекислого газа и метана. Представлено сравнение расчетных значений потока тепла с использованием мозаичного метода с учетом футпринта с измеренными значениями потока тепла. Сравниваются результаты оценок потоков метана с помощью метода турбулентных ковариаций и камерного метода. Представлено сравнение с наблюдениями результатов численного моделирования характеристик пограничного слоя и составляющих теплового баланса с помощью модели WRF.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-47-04408.

## **Потенциально доступная энергия и спектр флуктуаций давления в приземном слое атмосферы**

Юшков В.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[vpushkov@yandex.ru](mailto:vpushkov@yandex.ru)

**Ключевые слова:** *низкочастотные флуктуации давления, адиабатический шум, кинетическая энергия турбулентности, спектр адиабатических флуктуаций*

Проведено сопоставление измерений флуктуаций давления в приземном слое с помощью низкочастотного микрофона Brüel & Kjær (BK 4147) с интенсивностью турбулентных пульсаций в Москве (МГУ) и на Кисловодской высокогорной научной станции (КВНС). Показано, что наклон спектра пульсаций давления в инерционном интервале зависит от интенсивности мезомасштабных (конвективных) флуктуаций скорости ветра. СКО флуктуаций давления сопоставляется с кинетической энергией турбулентного перемешивания и дисперсией флуктуаций скорости звука. Рассмотрен переход спектра вихревых флуктуаций давления в адиабатическую компоненту. Сформулирована гипотеза о спектре излучаемых адиабатических волн (адиабатического шума). Демонстрируется возможность использования низкочастотных микрофонов и дифференциальных микробарографов для измерения интенсивности турбулентных флуктуаций. Показана необходимость повышения чувствительности и расширения спектрального диапазона используемых для измерений микрофонов и микробарографов.

## **Климатология коррелированных мезомасштабных возмущений вращательной температуры гидроксила вблизи мезопаузы**

Гаврилов Н.М.<sup>1</sup>, Попов А.А.<sup>1</sup>, Далин П.<sup>2,3</sup>, Перминов В.И.<sup>4</sup>, Перцев Н.Н.<sup>4</sup>, Медведева И.В.<sup>4,5</sup>,  
Аммосов П.П.<sup>6</sup>, Гаврильева Г.А.<sup>6</sup>, Колтовской И.И.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Шведский институт космической физики, Кируна, Швеция

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>6</sup>Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
[n.gavrilov@spbu.ru](mailto:n.gavrilov@spbu.ru)

**Ключевые слова:** акустико-гравитационные волны, мезопауза, ночное свечение гидроксила

Данные многолетних наземных наблюдений ночного свечения гидроксила (ОН) на высотах 85 – 90 км на сети российских станций используются для определения вращательной температуры возбужденного ОН, которая близка к нейтральной температуре атмосферы. Простая цифровая фильтрация применяется для изучения мезомасштабных возмущений температуры вблизи мезопаузы по данным спектральных измерений ночного свечения ОН в обсерваториях Звенигород (56° С.Ш., 37° в.д.) в 2004 – 2016 годах, Торы (52° С.Ш., 103° в.д.) в 2012 – 2017 гг. и Маймага (63° С.Ш., 130° в.д.) в 2000 – 2015 гг. Определены среднемесячные значения и стандартные отклонения температурных возмущений с периодами 0.7 – 11 ч, которые могут отражать интенсивность мезомасштабных волн в области мезопаузы. Фильтрация мезомасштабных вариаций осуществляется путем расчета разностей между парами измеряемых значений вращательной температуры ОН, разделенных фиксированными временными интервалами в диапазоне 0,5 - 2 ч. Полуэмпирический и статистический подходы используются для определения и исключения вкладов инструментального шума темнового тока и некоррелированных во времени атмосферных флуктуаций. Изучены сезонные колебания стандартных отклонений коррелированных во времени мезомасштабных возмущений вращательной температуры ОН в рассматриваемых наблюдательных пунктах. Межгодовые вариации могут дать информацию о долговременных изменениях активности атмосферных акустико-гравитационных волн, распространяющихся в слое ОН вблизи мезопаузы. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (гранты № 20-77-10006 и № 22-27-00171)

## **Дробное преобразование Фурье и распределения в фазовом пространстве: приложение к анализу радиозатменных данных**

Горбунов М.Е.<sup>1,2</sup>, Доловова О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва, Россия

[gorbunov@ifaran.ru](mailto:gorbunov@ifaran.ru)

**Ключевые слова:** Дробное преобразование Фурье, группа вращений, функция распределения Кирквуда, функция распределения Вигнера, радиозатменное зондирование

Методы время-частотного анализа играют существенную роль в анализе радиозатменных данных. Изначально применялась техника спектрограмм, которая позволила достигнуть значительных успехов в анализе полей в многолучевых зонах, отраженных сигналов и сеансов с глубоким погружением приемного спутника в присутствии тропосферных волноводов [1–5]. В дальнейшем было предложено использовать распределения Вигнера [6–7] и Кирквуда [8–9]. Спектрограмма и распределения Вигнера и Кирквуда принадлежат к классу псевдоплотностей на фазовом пространстве, каждая точка которого соответствует виртуальному лучу. Максимумы этих распределений лежат в окрестности лучевого многообразия.

Распределение Вигнера обладает лучшим разрешением по сравнению со спектрограммой. Это связано с тем, что спектрограмма использует вычисление спектров в относительно маленьких скользящих апертурах, тогда как распределение Вигнера требует многократного вычисления длинных Фурье-преобразований. Однако это приводит к тому, что распределение Вигнера является вычислительно затратным. Проще всего вычисляется распределение Кирквуда: оно требует лишь одного длинного Фурье-преобразования. Однако, оно не даст такого качества визуализации фазового пространства.

В данной работе мы рассматриваем метод вычисления сглаженной функции Вигнера с использованием дробного Фурье-преобразования и распределения Кирквуда. Дробное Фурье-преобразование реализует вращение фазового пространства на произвольный угол. В частности, Фурье-преобразование соответствует повороту на прямой угол. Мы показываем, что распределение Кирквуда дробного Фурье-преобразования от волнового поля, усредненное по углам поворота, равно функции Вигнера, свернутой со сглаживающим ядром. Мы описываем численную реализацию алгоритма вычисления сглаженной функции Вигнера и приводим примеры анализа простых тестовых сигналов и радиозатменных данных.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 20-05-00189).

### **Литература:**

1. Павельев А. Г. О возможности радиологического исследования радиополей вблизи зоны радиотени на трассах спутник-спутник // Радиотехн. и Электрон. 1998. Т. 43. № 8. С. 875–879.
2. Горбунов М.Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. М.: ГЕОС, 2019, 300 с.
3. Горбунов М.Е., Коваль О.А. Квантовые плотности Кирквуда и Вигнера, их свойства и приложения в радиофизике // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 2. С. 153–162.

## Распространение волновых возмущений в восточном направлении в стратосфере и мезосфере в Южном полушарии в зимний период

Гурьянов В.В.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия

[vv@kpfu.ru](mailto:vv@kpfu.ru)

**Ключевые слова:** волновые возмущения с временными масштабами планетарных волн, стратосфера, мезосфера

С использованием зимних (с мая по сентябрь) почасовых данных о геопотенциале реанализа ERA5 Южного полушария в тропосфере, стратосфере и мезосфере (до 0,01 гПа) за 2015-2019 гг. выполнен анализ спектров Хаяши для волновых возмущений с зональными волновыми числами 1-10 и с периодами от 8 часов до 151 дня. При этом оценивался вклад движущихся на восток (E), на запад (W) и стационарных (S) волн. Анализ показал, что в верхней стратосфере – нижней мезосфере (0.06-2 hPa) внетропических широт обнаруживаются распространяющиеся на восток волны (E) с большой амплитудой и периодами от 0.8 до 4 суток, существенно превышающей приливы и планетарные волны всех рассмотренных типов волн (W, E, S). Наибольшие значения энергии волн E отмечается на 60-65S в слое 1-0.3 hPa. Как правило, в диапазоне 0.8-4 суток спектр не сплошной, а наблюдается несколько пиков (в разные годы могут немного изменяться): 0.8-0.9, 1.1, 1.8-2, 3-4 суток. На 60-65S большей энергией обладают более короткопериодные волны ( $8e+04 \text{ m}^2$  на 60S в слое 0.6-1 hPa и периодом около 1.1 суток в 2015). С продвижением к полюсу, амплитуда волн убывает, а максимум энергии смещается в область больших периодов (до  $6-8e+03 \text{ m}^2$  на 85S и периодом 3-4 суток). Следует отметить, что для волн E фактически не наблюдается суточный прилив в рассматриваемой широтной зоне. Тогда как он хорошо выражен для волн W ( $4e+04 \text{ m}^2$  на 60S в слое 0.12-0.06 hPa в 2015) и в меньшей степени для волн S. Указанные пики могут испытывать межгодовую изменчивость по интенсивности ( $4-8e+04 \text{ m}^2$ ) и по периоду. В отдельные годы для волн E наблюдаются волновые возмущения с временными масштабами планетарных волн. Так в 2016 на 65S в слое 1-0.22 hPa наблюдалась хорошо выраженная 10 суточная волна E с амплитудами  $4-6e+04 \text{ m}^2$ , сопоставимая с волной 1.8 суток. В 2019 на 60S в слое 0.62-0.29 hPa хорошее развитие получили планетарные волны E с периодами 2-30 суток, амплитуда которых, наряду с волной с периодом 1.8 суток достигала  $4-5e+04 \text{ m}^2$ .

## **Возмущения нижней и верхней ионосферы, индуцированные тропическим циклоном Фахаі 2019 г.**

**Захаров В.И.<sup>1,2,3</sup>, Шалимов С.Л.<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

[zvi\\_555@list.ru](mailto:zvi_555@list.ru)

**Ключевые слова:** тропический циклон, акусто-гравитационные и внутренние волны, ионосферные неоднородности, миссия swarm, СДВ зондирование, электронная плотность

С использованием региональной сети станций сверхдлинноволнового (СДВ) радиопросвечивания в Дальневосточном регионе России и измерений возмущений электронной плотности посредством спутников миссии SWARM исследован отклик нижней и верхней ионосферы на прохождение тайфуна Фахаі 2019 (события TC 1915 по каталогу JMA <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>).

Исследовано 8 удачных пролетов спутников SWARM [1] относительно эпицентра тайфуна, из них в 5 случаях оказалось возможным уверенно выделить возмущения электронной концентрации относительной амплитуды от 3 до 10%. Регистрации способствовало то, что область локализации возмущения, связанного с ТЦ в ионосфере больше, чем на земле. Это является косвенным подтверждением волновой структуры этих возмущений [2,3], что в целом соответствует теоретическим оценкам размеров области для внутренних гравитационных волнх (ВГВ). В ряде случаев, структура зарегистрированных откликов напоминает интерференционную картину тскольких источников. Причиной это может быть то, что тайфун Фахаі 2019 в максимуме своей активности налетел на Японские острова, что могло вызвать дополнительную турбулизацию нижней атмосферы и генерацию волновых структур.

Приведен анализ возмущений [2] амплитуды и фазы СДВ сигнала передатчика NWC (21.78°S, 114.15°E) принимаемого станциями на Камчатке, Сахалине и Японии во время активной стадии тайфуна. Вейвлет анализ изучаемых сигналов показывает наличие волн в диапазоне периодов 8 – 55 мин, что соответствует атмосферным ВГВ.

В работе рассмотрен механизм воздействия ВГВ на нижнюю ионосферу, который позволяет интерпретировать наблюдаемые вариации фазы СДВ сигнала и вариации электронной плотности в верхней ионосфере.

Приведенные экспериментальные данные демонстрируют волновые возмущения амплитуды и фазы СДВ сигнала, а также электронной плотности во время активной стадии тайфуна.

Исследование выполнено при частичном финансировании РНФ (проект № 22-27-00182) и ГосЗадания МГУ (тема 01200408544).

### **Литература:**

1. Olsen N., Friis-Christensen E., Floberghagen R. et al. The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products // Earth, Planets and Space. 2013. v. 65. p. 1189-1200.
2. Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M., et al. Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals // JGR. 2012. v. 117. A09313.
3. Zakharov V.I., Sigachev P.K. Ionospheric disturbances from tropical cyclones // ASR. 2022. v. 69. N 11. P.132-141.

## **Исследование внутренних гравитационных волн инфракрасной камерой всего неба над территорией Якутии**

Колтовой И.И., Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Мордосова О.В., Мордовской П.Г.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия  
[koltigor@mail.ru](mailto:koltigor@mail.ru)

**Ключевые слова:** внутренние гравитационные волны, мезосфера, инфракрасная камера всего неба, временное дифференцирование

Для выявления внутренних гравитационных волн (ВГВ) была изучена пространственная неоднородность в эмиссиях свечения ночного неба на высоте около 87 км, где излучаются полосы молекул гидроксила. Регистрация волн проводилась при помощи инфракрасной цифровой камеры всего неба, установленной на оптическом полигоне Маймага (Якутия). Обработка данных выполнялась методом временного дифференцирования снимков. За два сезона (2016–2017 гг. и 2017–2018 гг.) было получено 1140 кадров с выраженной волновой периодической структурой, которые были определены как ВГВ. Для каждого случая обнаруженных ВГВ были определены такие параметры как: период волны, длина волны, скорость распространения, направление распространения, время и продолжительность наблюдения. Длины зарегистрированных волн варьируют от 9,6 до 52,5 км (среднее значение равно  $\sim 25$  км), наблюдаемые горизонтальные фазовые скорости изменяются от 22,5 до 158,3 м/с (среднее значение равно  $\sim 60$  м/с) и оцененные периоды находятся в пределах от 4,5 до 13,3 мин (среднее значение равно  $\sim 7$  мин).

### **Литература:**

1. Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights// Can. J.Phys. 1960. V. 38. 1441-1481.
2. Шефов Н.Н. и др. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики // М.: ГЕОС, 2006 – 741 с.
3. Taylor M.J. et al. // Planet. Space Sci. – 1987. – V. 35. – № 4. – P. 413–427.
4. Swenson G.R. et al. OH emission and gravity wave (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake, UT // Geophys. Res. Lett. – 1994. – V.21. – № 20. – P. 2239-2242.

## **Парадоксы волновых возмущений, формирующихся в атмосфере при импульсном выделении значительной энергии**

Косяков С.И.<sup>1</sup>, Куличков С.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ (БТС) 12 ЦНИИ Минобороны России

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[snik1953@gmail.com](mailto:snik1953@gmail.com)

**Ключевые слова:** импульсные возмущения; энергия взрывов; ударная волна; парадоксы; неустойчивость Кельвина-Гельмгольца

На основе анализа опытных данных, полученных при импульсном выделении в атмосфере значительной энергии  $Q$  (взрывы метеороидов, вулканов, различных зарядов, сверхзвуковых струи, пробой), делается вывод о значительном расширении фронтальной области волны по мере удаления от источника. Наблюдается энергетическое подобие ширины фронтальной области  $\Delta_R$  волны в широком диапазоне энергии источника  $Q \sim (10^{-8}-10^7)$  кг ТНТ, а её линейный размер превышает теоретические оценки на 4-5 порядков. Т.е., возмущения в атмосфере при импульсном выделении значительной энергии, не принимают форму ударной волны.

Приведенные факты нельзя объяснить в рамках молекулярно-кинетического механизма, турбулентностью, запылённостью пограничного слоя атмосферы, шероховатостью земной поверхности. Указанные данные противоречат эффекту опрокидывания волны любой конечной амплитуды по Риману, полученному в рамках уравнений газовой динамики. В этом - первый парадокс. Второй парадокс: вступление сильной волны, являющееся слабым разрывом, распространяется в воздухе со сверхзвуковой скоростью  $D$ . В соответствии с классической газовой динамикой слабый разрыв должен распространяться с местной скоростью звука  $c_0$ . С непрерывностью сжатия газа и большой шириной фронтальной области  $\Delta_R$  связан третий парадокс – в рамках представлений об адиабатическом процессе невозможно объяснить эффект возрастания энтропии на фронте волны.

Предполагается, что расширение фронтальной области обусловлено развитием неустойчивости Кельвина-Гельмгольца при быстром сжатии газа. В результате развития неустойчивости происходит мезодиффузия воздуха, которое и является непосредственной причиной расширения фронта волны. Данный механизм индифферентен по отношению к природе импульсного источника волновых возмущений, поскольку связан со свойствами и природой высокоскоростного деформирования газов. Учет предлагаемого механизма мезодиффузии (диффузии на мезоуровне) позволяет разрешить указанные парадоксы, в том числе и парадокс энтропии.

### **Литература:**

1. Косяков С.И., Куличков С.Н. Чунгузов И.П. Влияние устойчивости пограничного слоя атмосферы на параметры распространяющихся в нем акустических волн // Акуст. журн., 2019. Т. 65. № 4. С. 508–519.
2. Евтерев Л.С., Косяков С.И. Механизм и математическая модель трансформации сильной ударной волны в воздухе в непрерывное возмущение // Доклады академии наук, 2008. Т. 419, № 3. С. 334–337.

## Объемные колебания атмосферы

Кочин А.В.

Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Московская область  
[amarl@mail.ru](mailto:amarl@mail.ru)

**Ключевые слова:** объемные колебания в атмосфере, период колебаний, скорость подъема радиозонда, изменение давления и освещенности

Природа периодических движений воздуха в атмосфере в виде колебаний с различным периодом может быть различной, однако колебания любого типа возможны только при наличии возвращающей силы. В работе рассматривается реализация объемных колебаний атмосферы, в которых возвращающей силой является упругость воздуха. Процесс представляет собой одновременное адиабатическое сжатие (растяжение) всех слоев атмосферы. Период подобных колебаний определяется вертикальным профилем температуры и смещением колеблющихся масс воздуха по горизонтали и для политропной атмосферы период 409 секунд, а для изотермической атмосферы 480 секунд. Одновременный выпуск двух радиозондов со смещением по высоте 1500 метров показал, что вертикальные скорости изменяются синхронно с периодом около 350 секунд. Одновременное измерение атмосферного давления и освещенности также подтвердило наличие синхронных колебаний. На восходе терминатор вызывает возмущение в поле температуры, что вызывает противофазные колебания давления и освещенности с периодом около 350 - 400 секунд. При смещении центра масс от равновесного состояния к поверхности Земли воздух сжимается и приземное давление должно расти. Одновременно должна уменьшаться оптическая масса атмосферы, так как свет проходит меньшее расстояние в атмосфере и интенсивность света будет возрастать. Поэтому эти процессы должны быть противофазные. Оптическая масса атмосферы не будет меняться при возникновении внутренних гравитационных волн, так как этот процесс вызывает разнонаправленное смещение воздуха в различных частях атмосферы, что не должно изменять оптическую массу атмосферы. Периоды колебаний внутренних гравитационных волн и объемных колебаний близки, поэтому определить, что вызвало колебания, например, приземного давления сложно. Эффекты, которые будут вызывать в атмосфере объемные колебания, во многом аналогичны действию внутренних гравитационных волн, которые играют существенную роль в глобальном балансе энергии и количества движения атмосферы.

## **Оценка энергии акустико-гравитационных волн Лэмба от извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай и проявление их воздействия на концентрации аэрозоля**

Куличков С.Н.<sup>1,2</sup>, Чунчузов И.П.<sup>1</sup>, Попов О.Е.<sup>1</sup>, Горчаков Г.И.<sup>1</sup>, Мишенин А.А.<sup>1</sup>, Перепелкин В.Г.<sup>1</sup>,

Буш Г.А.<sup>1</sup>, Скороход А.И.<sup>1</sup>, Виноградов Ю.А.<sup>3</sup>, Семутникова Е.Г.<sup>2</sup>, Šepić J.<sup>4</sup>, Медведев И.<sup>5</sup>,

Гушин Р.А.<sup>1</sup>, Копейкин В.М.<sup>1</sup>, Беликов И.Б.<sup>1</sup>, Губанова Д.П.<sup>1</sup>, Карп

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба РАН", Обнинск, Россия*

<sup>4</sup>*Institute of oceanography and Fisheries, Split, Croatia*

<sup>5</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

[snik1953@gmail.com](mailto:snik1953@gmail.com)

**Ключевые слова:** мода Лэмба, акустико-гравитационные волны, цунами, концентрация аэрозоля, ядерный взрыв

Представлены данные регистрации сигналов акустико-гравитационных волн от извержения вулкана на сети низкочастотных микробарографов в московском регионе и впервые идентифицирована основная мода этих волн в головной части сигналов: мода Лэмба. Благодаря корреляционному анализу сигналов в разных пунктах было обнаружено шесть приходов сигналов от вулкана, совершивших до двух оборотов вокруг Земли, что свидетельствовало о небывалой энергии взрыва вулкана в сравнении с энергиями всех ядерных взрывов в атмосфере, произведенных до настоящего времени.

Оценка акустической энергии, вышедшей от подводного вулкана в атмосферу и эквивалентной энергии некоторого наземного ядерного взрыва, была проведена по параметрам волны Лэмба с помощью формулы, полученной ранее Pierce and Posey (1971). Эта энергия оказалась на порядок больше ее значения в 18 МТ ТНТ, оцененной первоначально в [Mike Wall, 2022]. Сравнение параметров (амплитуды и длительности) волны Лэмба от вулкана и от наиболее мощной ядерной бомбы в 58-Мт ТНТ подтвердило наш вывод о том, что акустическая энергия, выделившаяся при извержении вулкана, превышала, по меньшей мере, 58 МТ ТНТ.

Было изучено влияние волны Лэмба на вариации концентраций аэрозоля и обнаружен определенный скачок в концентрации PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub> одновременно с третьим приходом волны Лэмба в IFA. Однако, амплитуды скачков концентрации аэрозоля при прохождении волн Лэмба оказались значительно слабее амплитуд подобных скачков, наблюдавшихся при прохождении внутренних гравитационных волн от метеорологических фронтов через измерительную сеть. Тем не менее, эффект влияния волны Лэмба на концентрацию аэрозоля был обнаружен даже после одного оборота этой волны вокруг Земли.

## **Взаимосвязанная генерация акустических и внутренних гравитационных волн тропосферными источниками тепла**

Курдяева Ю.А.<sup>1,2</sup>, Кшевецкий С.П.<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>КФ Института Земного Магнетизма, Ионосферы и распространения радиоволн РАН, Калининград, Россия

<sup>3</sup>Балтийский государственный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

[yakurdyeva@gmail.com](mailto:yakurdyeva@gmail.com)

**Ключевые слова:** акустические волны, внутренние гравитационные волны, тропосферные источники, верхняя атмосфера

Аналитически рассмотрена общая проблема генерации акустических и внутренних гравитационных волн в изотермической атмосфере локальным источником тепла на тропосферных высотах. Теоретически показано, что генерация внутренних гравитационных волн источником тепла не может происходить без генерации инфразвуковых волн тем же источником, и наоборот. Рассчитаны парциальные источники инфразвуковых волн и внутренних гравитационных волн для тепловых источников. Показано, что мощности этих парциальных источников примерно равны друг другу, независимо от частоты и формы общего источника тепла. Формулы спектральных источников акустических и гравитационных волн, генерируемых тропосферными источниками, позволяют расширить знания о поведении волн в атмосфере. Получены некоторые оценки амплитуд генерируемых волн. Показано, что если характерное время изменения источника больше периода Вэйселя-Брента, то амплитуда генерируемых гравитационных волн будет больше амплитуды инфразвуковой волны. Однако эта разница в амплитудах волн небольшая и не дает оснований пренебрегать инфразвуковыми волнами.

Полученные результаты могут быть использованы при усовершенствовании атмосферных моделей разных типов. Это может помочь разработать более совершенные параметризации эффектов, вызванных распространением акустико-гравитационных волн, в моделях общей атмосферной циркуляции атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор 075-15-2021-583).

## **Использование полей колебаний атмосферного давления для расчетов волн от метеорологических источников**

**Кшевецкий С.П.<sup>1,2,4</sup>, Курдяева Ю.А.<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Балтийский государственный университет им. И. Канта, Калининград, Россия*

<sup>3</sup>*КФ Института Земного Магнетизма, Ионосферы и распространения радиоволн РАН,  
Калининград, Россия*

<sup>4</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

[renger@mail.ru](mailto:renger@mail.ru)

**Ключевые слова:** *атмосферные волны, поля давления, моделирование*

При изучении и моделировании волновых явлений, порождаемых разнообразными тропосферными источниками, существует следующая трудность. Как правило, мы имеем недостаточно информации о тропосферных источниках, вследствие трехмерной структуры этих источников и их изменчивости. Однако эти тропосферные источники изменяют давление у поверхности Земли. Давление у поверхности Земли регистрируется сетями микробарографов, и, вероятно, может находиться из каких-то других экспериментальных измерений. Возникает естественная идея использовать эти экспериментально получаемые поля колебаний атмосферного давления для моделирования и исследования волновых возмущений от разнообразных тропосферных процессов. Излагается теория таких расчетов (математическая постановка соответствующей задачи и доказательство ее корректности). Примеры численных расчетов волновых явлений от реально регистрируемых колебаний атмосферного давления.

## **Межгодовые вариации температуры мезопаузы и максимума электронной концентрации по данным спектрометрических и радиофизических измерений в Восточной Сибири**

Медведева И.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

[ivmed@iszf.irk.ru](mailto:ivmed@iszf.irk.ru)

**Ключевые слова:** атмосфера, ионосфера, мезопауза, температура, максимум электронной концентрации, межгодовые вариации

Представлены результаты исследования межгодовых вариаций температуры области мезопаузы ( $T_m$ ) и максимума электронной концентрации ( $NmF2$ ) по многолетним (2008-2020 гг.) данным измерений на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН. Для анализа использованы данные спектрометрических измерений эмиссии молекулы гидроксила (полоса (6-2), 834.0 нм, высота максимума излучения  $\sim 87$  км), полученные в Геофизической обсерватории (51.8° N, 103.1° E, Торы), и значения максимума электронной концентрации  $NmF2$ , полученные по данным вертикального зондирования на иркутском ионозонде DPS-4 (52.3° N, 104.3° E). Исследованы и сопоставлены межгодовые вариации параметров  $T_m$  и  $NmF2$  и их изменчивости в различных временных периодах: межсуточные вариации ( $T > 24$  ч), приливные вариации ( $8 \text{ ч} \leq T \leq 24 \text{ ч}$ ), а также вариации с периодами внутренних гравитационных волн ( $T < 8$  ч). К анализу привлечены данные о вариациях индекса Южной осцилляции (Southern Oscillation Index) в формате Climatic Research Unit of East Anglia University. Проанализировано влияние солнечной и геомагнитной активности на многолетние значения температуры области мезопаузы, максимума электронной концентрации и их изменчивостей. Обнаружена корреляция межсуточной изменчивости температуры мезопаузы с вариациями SOI, с пиком изменчивости в фазе Ла Нинья и минимумом в фазе Эль Ниньо. Выявлена значительная корреляция межсуточной ионосферной изменчивости с геомагнитной активностью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-17-00146, <https://rscf.ru/project/22-17-00146/>.

## **О распространении поверхностных волн в невязкой экспоненциально стратифицированной жидкости**

Очиров А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлinskого РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

[otchirov@mail.ru](mailto:otchirov@mail.ru)

**Ключевые слова:** *поверхностные волны, стратификация, дисперсионное соотношение*

Исследовано распространение двумерных периодических волн в невязкой непрерывно стратифицированной жидкости со свободной поверхностью в широком диапазоне частот (от  $10^{-4}$  Гц до  $5 \cdot 10^2$  Гц). На основе полной системы уравнений гидродинамики [1] была составлена и проанализирована упрощенная модель [2, 3]. Были получены соотношения, описывающие дисперсионные зависимости, а также выражения для фазовых и групповых скоростей для поверхностных волн в физически наблюдаемых переменных. Показано, что при достижении длиной волны значений порядка масштаба стратификации жидкость ведет себя как однородная. С приближением частоты волны к частоте плавучести скорость перенос энергии уменьшается: групповая скорость поверхностных волн стремится к нулю, а фазовая – к бесконечности. В случае инфинитезимальных возмущений стратифицированной жидкости со свободной поверхностью поверхностные и внутренние волны существуют в разделенных частотных интервалах. Исследованы и визуализированы потоки энергии и импульса при распространении поверхностных волн. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>).

### **Литература:**

1. Chashechkin Y. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows //Axioms – 2021 – Т 10 – № 4 – С. 286.
2. Chashechkin Y. D., Ochirov A. A. Periodic Waves and Ligaments on the Surface of a Viscous Exponentially Stratified Fluid in a Uniform Gravity Field //Axioms – 2022 – Т 11 – № 8 – С.402.
3. Очиров А.А., Чашечкин Ю.Д. Двумерные периодические волны в невязкой непрерывно стратифицированной жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2022 – Т 58 – № 5 – С.524

## **Волновые и сопутствующие высокоградиентные течения – лигаменты в вязкой непрерывно стратифицированной жидкости**

Очилов А.А.<sup>1,2</sup>, Чашечкин Ю.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

[otchirov@mail.ru](mailto:otchirov@mail.ru)

**Ключевые слова:** поверхностные волны, высокоградиентные структуры, лигаменты, дисперсионное соотношение

При распространении поверхностных волн в вязкой непрерывно стратифицированной жидкости возникают сопутствующие высокоградиентные течения – лигаменты. Математическая формулировка задачи строится на основании полной системы уравнений [1] в упрощенном виде [2]. В настоящей работе проведено исследование дисперсионных соотношений волновых и лигаментных движений. Волновые движения описываются регулярными решениями дисперсионных соотношений, а лигаментные – сингулярными. Были получены зависимости фазовых и групповых скоростей для поверхностных волн и их аналогов для сопутствующих высокоградиентных течений. Исследованы и визуализированы потоки энергии и импульса всех компонентов волнового движения. Для полученных соотношений выполняются предельные переходы к более простым и известным случаям (модель вязкой однородной жидкости и модель идеальной равномерно стратифицированной жидкости).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>).

### ***Литература:***

1. Chashechkin Y. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows //Axioms. – 2021. – Т. 10. – №. 4. – С. 286.
2. Chashechkin Y. D., Ochirov A. A. Periodic Waves and Ligaments on the Surface of a Viscous Exponentially Stratified Fluid in a Uniform Gravity Field //Axioms. – 2022. – Т. 11. – №. 8. – С. 402.

## **Волновая активность нижней термосферы по наблюдениям вариаций интенсивности ночной эмиссии 557,7 нм**

Парников С.Г., Иевенко И.Б., Мордовской П.Г.

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия*  
[koltigor@mail.ru](mailto:koltigor@mail.ru)

**Ключевые слова:** свечение ночного неба, зеленая линия [OI], нижняя термосфера, волновая активность

Большие изменения интенсивности эмиссии 557,7 нм атомарного кислорода в течение ночи в магнитно-спокойных условиях наблюдаются часто и обусловлены вариациями плотности нейтральной атмосферы на высоте излучения зеленой линии [Фишкова, 1983; Михалев, 2011]. Модуляция плотности может быть вызвана планетарными волнами, внутренними гравитационными волнами и акустико-гравитационными волнами, которые возникают в нижней и средней атмосфере и распространяются до высот нижней термосферы [Красовский и др.; 1986, Шефов и др., 2006].

В данной работе представлены результаты измерений интенсивности эмиссии 557,7 нм ночного неба на высокой географической широте (63°N) в дни с низкой геомагнитной активностью. Средняя интенсивность эмиссии 557,7 нм для февраля и марта имела наибольшие значения ~400 и ~300 Релей, соответственно, в годы максимума цикла солнечной активности. Это, вероятно, обусловлено ростом концентрации атомарного кислорода на высоте излучения зеленой линии при увеличении солнечной активности согласно эмпирической модели MSIS-90. Анализ коэффициента вариации этой эмиссии показал, что нет тесной связи этого параметра с солнечной активностью.

### ***Литература:***

1. Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: 272 с. 1983.
2. Михалев А.В. Вариабельность атмосферной эмиссии 557,7 нм. Солнечно-земная физика. СО РАН. №17. С.184-188. 2010.
3. Красовский В.И., Семенов А.И. и др. Вариации доплеровской температуры и интенсивности эмиссии 557,7 нм. Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 26. № 6. С. 941-945. 1986.
3. Шефов Н.Н., Семенов А.Н., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы-индикатор ее структуры и динамики. М., ГЕОС. 741 с. 2006.

## Об атмосферных планетарных волнах на ионосферных высотах по данным обсерватории Москва

Рябова С.А.<sup>1,2</sup>, Шалимов С.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

[ryabovasa@mail.ru](mailto:ryabovasa@mail.ru)

**Ключевые слова:** планетарные волны, геомагнитное поле, F2-слой ионосферы

Исследование комплекса физических процессов, реализующих связи нижней и верхней атмосферы, является одной из важнейших задач физики атмосферы. Наряду с термическими приливами, достаточно мощным фактором, проявляющимся на разных высотах, являются атмосферные планетарные волны. Рассмотрен вопрос о возможном присутствии планетарных волн на высотах ионосферы. К анализу отклика верхней ионосферы на прохождение планетарных волн привлекались данные вертикального зондирования в г. Москве (с. Красная Пахра, 55.47 с.ш., 37.3 в.д.), по которым исследовались вариации плотности плазмы. Отклик нижней ионосферы исследовался по вариациям ионосферного тока, для чего использовались данные инструментальных наблюдений за вариациями геомагнитного поля на той же станции.

## **Дисперсионные характеристики приводного (волноводного) атмосферного канала распространения радиолокационных сигналов**

Теохаров А.Н.

*Радиотехнический институт им. акад. А.Л. Минца, Москва, Россия*  
[ateokharov@rti-mints.ru](mailto:ateokharov@rti-mints.ru)

**Ключевые слова:** радиолокационный сигнал, волновод, модовая радиолокационная модель

На основе модовой радиолокационной модели волноводного канала над морской поверхностью рассмотрены дисперсионные характеристики тропосферных волноводов, приводящие к зависимости сигнальных мод от частоты и искажению принятого радиолокационного сигнала СВЧ-диапазона.

Оценка характеристик приповерхностного инверсного волновода проведена на основе параболической модели профиля диэлектрической проницаемости, достаточно хорошо описывающей распространение низших волноводных мод.

Для оценки характеристик приводного волновода испарения использована линейная модель профиля, хорошо описывающая распространение низших волноводных мод.

Численные оценки для характерных параметров приводной тропосферы показывают, что задержки сигнала в обоих рассмотренных типов волноводов составляют порядка 1 мкс на расстоянии 1000 км.

Искажения огибающей сигнала на низших модах в приповерхностном инверсном волноводе незначительно и во многих случаях им можно пренебречь, тогда как в приводном волноводе испарения оно может оказаться значительным и требует корректировки с использованием антидисперсионных фильтров.

## **Исследование температурного режима средней атмосферы Рэлеевским лидаром во время внезапных стратосферных потеплений в северо-восточной части Азии и зависимость от индексов КДК и ЭНЮК**

Титов С.В., Николашкин С.В.

*Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия*  
[stitov@ikfia.ysn.ru](mailto:stitov@ikfia.ysn.ru)

**Ключевые слова:** *лидар, внезапные стратосферные потепления, среднезональный ветер, квазидвухлетнее колебание, Эль-Ниньо Южное колебание*

В работе представлены характеристики внезапных стратосферных потеплений (ВСП), наблюдаемые над полигоном «ШАЛ» ИКФИА СО РАН (61° с. ш., 129° в. д.) в зимний период с 2005 по 2017 год и с 2018 по 2021 год над оптическим полигоном «Маймага» ИКФИА СО РАН (63° с. ш., 129° в. д.). В исследовании используются 16-летние измерения температуры Рэлеевским лидаром на высотах от 25 до 60 км. Наблюдаемые ВСП классифицированы на сильные и слабые в зависимости от наличия обращения направления среднезонального ветра во время ВСП на высоте 10 гПа по данным реанализа. В среднем над пунктами наблюдений зарегистрированы от 1 до 4 событий ВСП ежегодно, с середины декабря по март месяц. Полученные данные хорошо согласуются со спутниковыми измерениями на приборе MLS (AURA), с данными Берлинского университета и данными ECMWF. Во время всех событий ВСП наблюдается опускание стратопавзы до 30 км, причем, чем выше температура потепления, тем ниже опускается стратопавза, кроме этого в некоторых случаях наблюдается сдвоение стратопавзы. Рассмотрено поведение температурного режима средней атмосферы в северо-восточной части Азии в зависимости от индекса квазидвухлетних колебаний (КДК) экваториального среднего зонального ветра и индекса Эль-Ниньо Южное колебание (ЭНЮК). Анализ зависимости ВСП от индекса КДК и ЭНЮК показал, что в большинстве случаев ВСП происходят около точек локального минимума или максимума этих явлений.

## **Эволюция сигнала атмосферного давления от вулкана Тонга при удалении от него**

Чунчузов И.П., Куличков С.Н., Попов О.Е., Перепелкин В.Г.  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия  
[snik1953@gmail.com](mailto:snik1953@gmail.com)

**Ключевые слова:** волна Лэмба, акустические и гравитационные моды, инфразвуковые волны, энергия извержения

Предложена модель распространения сигнала атмосферного давления от извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, с помощью которой дано объяснение некоторым закономерностям в изменении формы наблюдаемого сигнала с ростом расстояния от вулкана. Модель основана на решении линеаризованного уравнения Кортевега де-Вриза (КДВ), которое описывает изменение формы волны Лэмба в зависимости от расстояния от источника. Проводится сравнение наблюдаемых и модельных сигналов, полученных в виде суперпозиции волны Лэмба и акустических мод, рассчитанных для трех инфразвуковых станций (IS22, IS24 и IS30). Дается оценка энергии извержения вулкана по амплитуде флуктуаций атмосферного давления и характерной длительности сигналов, зарегистрированных на ближних к вулкану инфразвуковых станциях.

## **Спектральный перенос энергии и энтропии в атмосфере по данным реанализа NCEP-CFSR**

Степанов Р.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

rodion@icmm.ru

**Ключевые слова:** турбулентная конвекция, спектральный перенос в атмосфере, реанализ

Турбулентная конвекция в атмосферном слое Земли может проявлять спектральные свойства, характерные для двумерной, трехмерной или геострофической турбулентности. Имеются различные теории, объясняющие наблюдаемое изменение спектрального индекса энергии пульсаций скорости ветра на мезомасштабах порядка 500 км. Среди всех факторов, влияющих на динамику атмосферных течений, взаимодействие структур поля скорости различных масштабов играет одну из ключевых ролей. Однако решение проблемы теоретического описания спектрального переноса, которое бы принимало во внимание все особенности структуры атмосферной турбулентности, до сих пор не найдено. В данной работе сделана попытка выделить эти особенности с использованием глобальных данных реанализа NCEP-CFSR о состоянии атмосферы с 1979 по 2022 год. В первую очередь решается задача выделения вариации поля скорости на различных масштабах. Применение непрерывного двумерного вейвлет-преобразования позволило разделить масштабы в диапазоне от 100 км до 10000 км. Вторая задача состоит в оценке спектрального потока. С учетом сильной анизотропии сетки данных релевантным представляется анализ взаимодействия структур течения в горизонтальной плоскости. Был исследован спектральный перенос энергии и энтропии пульсаций горизонтального течения. Показано, что в диапазоне масштабов 400-600 км происходит резкое перераспределение в физическом пространстве областей с наибольшей интенсивностью спектрального переноса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-61-00098).

## **Содержание**

### *Секция I. Турбулентность в атмосфере и океане*

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Вульфсон А.Н.</u> , Николаев П.В. <b>Вариант теории локального подобия и аппроксимация вертикальных профилей турбулентных моментов конвективного пограничного слоя атмосферы</b> .....                               | 7  |
| <u>Горчаков Г.И.</u> , Чхетиани О.Г., Карпов А.В., Копейкин В.М., Гущин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В. <b>Турбулентные потоки пылевого аэрозоля при всплесковой сальтации</b> .....                                    | 8  |
| Захаров В.И., <u>Сигачев П.К.</u> <b>Возмущения от крупных циклонов, регистрируемые в озоновом слое</b> .....                                                                                                           | 9  |
| <u>Иванова А.Р.</u> , Комасько Н.И., Скриптунова Е.Н., Завьялова А.А. <b>Атмосферная турбулентность, влияющая на полеты воздушных судов, и подходы к ее прогнозированию</b> .....                                       | 10 |
| <u>Карпов А.В.</u> , Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Гущин Р.А., Даценко О.И. <b>Исследование стратификации микроструктуры пылевого аэрозоля на опустыненной территории</b> .....                                         | 11 |
| <u>Кузнецов Е.А.</u> , Михайлов Е.А. <b>Нелинейная динамика скользящих течений</b> .....                                                                                                                                | 12 |
| <u>Приймак В.Г.</u> <b>Математические модели ламинарно-турбулентного перехода в сдвиговых течениях вязкой жидкости</b> .....                                                                                            | 13 |
| <u>Прохорова У.В.</u> , Терехов А.В., Иванов Б.В. <b>Вклад турбулентных потоков в таяние поверхности ледников архипелага Шпицберген, расположенных ниже современной снеговой линии</b> .....                            | 14 |
| Рыскаленко П.Р., <u>Малиновская Е.А.</u> , Чхетиани О.Г. <b>Арт объекты Эрбу и крупномасштабные квазидвумерные турбулентные структуры</b> .....                                                                         | 15 |
| <u>Солёная О.А.</u> , Шишов Е.А., Чхетиани О.Г., Азизян Г.В., Копров В.М. <b>О турбулентном потоке вихря в приземном слое атмосферы</b> .....                                                                           | 16 |
| <u>Степанов Д.В.</u> , Островский А.Г., Лазарюк А.Ю. <b>О диапикническом перемешивании на континентальном склоне в северо-западной части Японского моря</b> .....                                                       | 17 |
| <u>Степанов Д.В.</u> , Кузнецова Н.В., Фомин В.В., Гусев А.В., Дианский Н.А. <b>Мезомасштабная динамика и вихревой перенос тепла в Японском море</b> .....                                                              | 18 |
| <u>Степанов Д.В.</u> , Островский А.Г. <b>Турбулентное перемешивание и его вклад в вертикальные потоки тепла, соли и кислорода в северо-западной части Японского моря в апреле-октябре 2015 г.</b> .....                | 19 |
| <u>Чухарев А.М.</u> , Павлов М.И. <b>Нестационарные взаимодействия атмосферы и моря на малых и субмезомасштабах</b> .....                                                                                               | 20 |
| <u>Шелехов А.П.</u> , Афанасьев А.Л., Кабанов М.М., Кобзев А.А., Шелехова Е.А., Поплевина О.Н. <b>Исследование турбулентности в атмосферном пограничном слое с использованием БПЛА и акустического анемометра</b> ..... | 21 |

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Шишов Е.А.</u> , Соленая О.А., Копров В.Н., Азизян Г.В. <b>Обобщение экспериментальных данных, полученных в ходе полевых экспериментов в Ростовской области</b> ..... | 22 |
| <u>Юшков В.П.</u> <b>Флуктуации скорости звука и их диссипация в атмосферном пограничном слое</b> .....                                                                  | 23 |
| <u>Юшков В.П.</u> , Каллистратова М.А. <b>Флуктуации давления в турбулентной атмосфере</b> .....                                                                         | 24 |

## *Секция II. Геофизическая гидродинамика*

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Багатинская В.В.</u> , Дианский Н.А., Гусев А.В., Морозов Е.Г., Багатинский В.А. <b>Геострофическая и ветровая составляющие Антарктического циркумполярного течения</b> .....                                        | 25 |
| <u>Багатинский В.А.</u> , Дианский Н.А. <b>Океанические механизмы мультидекадной изменчивости климата в атлантическом секторе Мирового океана</b> .....                                                                 | 26 |
| <u>Вазасва Н.В.</u> , Чхетиани О.Г. <b>Трансграничный перенос аэрозоля и пыльная буря в Калмыкии осенью 2020 г.</b> .....                                                                                               | 27 |
| <u>Гледзер Е.Б.</u> , <u>Гледзер А.Е.</u> , Хапаев А.А., <u>Чхетиани О.Г.</u> <b>Волны Россби и аномалии зональных потоков в аналогах ячеек Хэдли и Фарреля общей циркуляции атмосферы: модель и эксперименты</b> ..... | 28 |
| <u>Гончаров В.П.</u> <b>Динамика экваториальных струй, генерируемых температурным фронтом</b> .....                                                                                                                     | 29 |
| <u>Жиленко Д.Ю.</u> , Кривоносова О.Э. <b>Неустойчивость течений при вращательных колебаниях жидкости</b> .....                                                                                                         | 30 |
| <u>Жиленко Д.Ю.</u> , Кривоносова О.Э. <b>Течения во вращающихся сферических слоях в присутствии шума</b> .....                                                                                                         | 31 |
| <u>Жмур В.В.</u> , Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П., Арутюнян Д.А. <b>Эволюции мезомасштабных вихрей океана в неоднородных баротропных течениях</b> .....                                                   | 32 |
| <u>Залесный В.Б.</u> <b>Квазигеострофическая модель потенциальной завихренности в океане с вариационным управлением</b> .....                                                                                           | 33 |
| <u>Ингель Л.Х.</u> <b>Модель склоновых течений над термически неоднородной поверхностью</b> .....                                                                                                                       | 34 |
| <u>Ингель Л.Х.</u> <b>О движении инерционных частиц в нестационарных/неоднородных течениях</b> .....                                                                                                                    | 35 |
| <u>Калашник М.В.</u> , Курганский М.В., Чхетиани О.Г. <b>Бароклинная неустойчивость пространственно периодических течений</b> .....                                                                                     | 36 |
| <u>Кострыкин С.В.</u> , Якушкин И.Г., <b>Исследование стационарных течений и скорости затухания нестационарных течений кармановской модели с вынуждающей силой, находящихся в режиме Бетчелора</b> .....                | 37 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Кравцов С.В., Резник Г.М.</u> Взаимодействие монополюсного вихря с зональным сдвиговым течением .....                                                                                                                                                                 | 38 |
| <u>Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.</u> Роль микропроцессов в макромоделях динамики олового переноса .....                                                                                                                                                                | 39 |
| <u>Насырова Д.А., Башмаков Р.А.</u> Колебания столба жидкости в открытой скважине, подверженной ГРП.....                                                                                                                                                                 | 40 |
| <u>Плакшина Ю.Ю., Пуштаев А.В., Винниченко А.Н., Уваров А.В.</u> Исследование влияния слабой поверхностной пленки на возникновение и распространение ветровых волн в канале с помощью модификации цветного шпирен-метода и метода цифровой трассерной визуализации ..... | 41 |
| <u>Рубчяна А.В., Май Р.И., Тимофеева А.Б.</u> Режимные характеристики изменчивости полыней Карского моря .....                                                                                                                                                           | 42 |
| <u>Слюняев А.В., Степанянц Ю.А., Кокорина А.В.</u> Нелинейные группы волн на морской поверхности со льдом.....                                                                                                                                                           | 43 |
| <u>Чашечкин Ю.Д.</u> Динамика и термодинамика течений в атмосфере и гидросфере.....                                                                                                                                                                                      | 44 |
| <u>Чашечкин Ю.Д.</u> Перенос веществ контактирующих сред в течениях импакта капли.....                                                                                                                                                                                   | 45 |

*Секция III. Общая циркуляция атмосферы, динамика и предсказуемость атмосферных и климатических процессов*

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Krupchatnikov V., Platov G., Gradov V., Borovko I., Volodin E.</u> Response of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation to Arctic ice reduction - a numerical study with INM-CM48 climate system model .....                        | 46 |
| <u>Акперов М.Г.*</u> , Елисеев А.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Парфенова М.Р., Кёниг Т. Потенциал ветровой энергетики в арктических и субарктических широтах и его изменения в 21 веке по расчетам с региональной климатической моделью ..... | 47 |
| <u>Александров Г.А.</u> Предсказуемость повышения максимальной среднемесячной температуры воздуха в центральной части Русской равнины для сценария SSP 3-7.0 .....                                                                            | 48 |
| <u>Александров Г.А., Гинзбург А.С., Чернокульский А.В.</u> Количественные показатели необходимости превентивной адаптации к изменению климата.....                                                                                            | 49 |
| <u>Александров Г.Г.</u> Оценка изменений удельного потребления тепла для отопления зданий по разным климатическим моделям.....                                                                                                                | 50 |
| <u>Алексеева Е.Г., Анискина О.Г.</u> Влияние динамических процессов в стратосфере на термический режим тропосферы .....                                                                                                                       | 51 |
| <u>Алипова К.А., Гойман Г.С., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Толстых М.А.</u> Учет неопределенностей в ансамблевой системе прогноза погоды на основе модели ПЛАВ.....                                                                              | 52 |

|                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Зоркальцева О.С., Мартынова Ю.В.</u> Отклик температуры воздуха в нижней тропосфере и стратосфере в зимний период на изменение повторяемости блокирований над Уралом - Сибирью .....       | 53 |
| <u>Бабанов Б.А., Семенов В.А.</u> Кластеризация погодных режимов в Евро-Атлантическом секторе в зимний и летний периоды различными методами .....                                                                          | 54 |
| <u>Безотечская Е.А., Чхетиани О.Г., Мохов И.И.</u> Изменчивость струйных течений в атмосфере Северного полушария в последние десятилетия (1980-2021 гг.) .....                                                             | 55 |
| <u>Бекряев Р.В.</u> Количественное оценивание полярного усиления. Статистические проблемы .....                                                                                                                            | 56 |
| <u>Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г.</u> Первые результаты прогноза по совместной модели атмосфера - океан для региона Белого моря в летний период года .....                                                                  | 57 |
| <u>Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И.</u> Изменение циркуляции стратосферы Арктики в XXI веке по расчетам климатической модели ИВМ РАН .....                                                      | 58 |
| <u>Вильфанд Р.М., Хан В.М., Куликова И.А., Володин В.М., Воробьева В.В., Макарова М.Е.</u> Анализ макроциркуляции и предсказуемости аномальных атмосферных процессов регионального масштаба в 2021-2022 гг. ....           | 59 |
| <u>Володин Е.М.</u> Развитие модели климатической системы ИВМ РАН .....                                                                                                                                                    | 60 |
| <u>Воробьева В.В., Володин Е. М., Грицун А.С., Тарасевич М.А.</u> Анализ предсказуемости ведущих мод климатической изменчивости на временных масштабах до 5 лет на основе климатической модели INMCM5 .....                | 61 |
| <u>Воробьева В.В., Володин Е.М.</u> Воспроизведение аномалий осадков в сезонных ретроспективных прогнозах климатической модели INMCM5 на лето 2021 года ..                                                                 | 62 |
| <u>Голицын Г.С.</u> Проявление законов А. Н. Колмогорова в океанах и атмосферах .....                                                                                                                                      | 63 |
| <u>Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.</u> Оценки естественных потоков парниковых газов в атмосферу и их вклада в изменения климата в 21 веке .....                                                                     | 64 |
| <u>Емелина С.В., Воробьева В.В., Тарасевич М.А., Володин Е.М., Хан В.М.</u> Сезонный прогноз начала пыления березы на европейской территории России с использованием модели INMCM5 .....                                   | 65 |
| <u>Железнова И.В., Гущина Д.Ю.</u> Изменчивость экстремальных температур воздуха и осадков в различных природных зонах .....                                                                                               | 66 |
| <u>Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю.</u> Долговременная изменчивость характеристик внезапных стратосферных потеплений по данным Era 5 .....                                                                                  | 67 |
| <u>Зюляева Ю.А., Собаева Д.А.</u> Динамика стратосферно-тропосферного взаимодействия в различные фазы Эль-Ниньо Южного Колебания и Тихоокеанского десятилетнего колебания в идеализированных модельных экспериментах ..... | 68 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Иванов Б.В., Карандашева Т.К., Демин В.И., Ревина А.Ф. Особенности изменений и изменчивости климата в Западном секторе Арктики на примере Баренцево-морского региона .....</u>                                                                                 | 69 |
| <u>Ильющенкова И.А., Коржииков А.Я., Иванов Б.В. Формирование экстремальных температур воздуха в районе Шпицбергена в холодный период года .....</u>                                                                                                              | 70 |
| <u>Калмыкова О.В. Водяные смерчи в России и в мире: климатология, условия возникновения, характеристики и возможности прогноза .....</u>                                                                                                                          | 71 |
| <u>Кочин А.В. Влияние вращения Земли на общую циркуляцию атмосферы .....</u>                                                                                                                                                                                      | 72 |
| <u>Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г. Предварительные результаты учета реального распределения типов подстилающей поверхности в регионе Санкт-Петербурга ...</u>                                                                                                      | 73 |
| <u>Лоскутов Е.М., Вдовин В.В., Клиньшов В.В., Гаврилов А.С., Мухин Д.Н., Фейгин А.М. Оценка интервальной устойчивости климата среднего Плейстоцена при помощи эмпирической модели. ....</u>                                                                       | 74 |
| <u>Мизяк В.Г., Толстых М.А., Алипова К.А., Рогутов В.С., Гойман Г.С. Новая система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России на основе модели атмосферы ПЛАВ и ансамблевого фильтра Калмана с переходом в пространство ансамбля .....</u> | 75 |
| <u>Морару Е.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В. Изменчивость турбулентных потоков тепла синоптического масштаба на поверхности океанов Северного полушария с 1979 по 2018 гг. ....</u>                                                                               | 76 |
| <u>Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажев А.В. Фазовый сдвиг между изменениями глобальной приповерхностной температуры и содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере по расчетам с ансамблем моделей CMIP6 .....</u>                                           | 77 |
| <u>Мухин Д.Н. Идентификация и анализ режимов циркуляции атмосферы средних широт на основе данных .....</u>                                                                                                                                                        | 78 |
| <u>Набокова Е.В., Куликова И.А., Субботин А.В., Емелина С.В. Влияние колебания Маддена-Джулиана на атмосферную циркуляцию в умеренных широтах Северного полушария .....</u>                                                                                       | 79 |
| <u>Нарижная А.И., Чернокульский А.В., ДёртеХандорф Модельные оценки зависимости интенсивности холодных вторжений в Баренцевом море от ледовой обстановки и температуры поверхности океана .....</u>                                                               | 80 |
| <u>Нерушев А.Ф., Вишератин К.Н., Ивангородский Р.В. Характеристики поля ветра верхней тропосферы как индикаторы климатической изменчивости .....</u>                                                                                                              | 81 |
| <u>Несвятипаска А.И., Железнова И.В. Оценка стационарности поля завихренности субтропических антициклонов для определения возможности применения к ним методики индивидуальных вихрей .....</u>                                                                   | 82 |
| <u>Парфенова М.Р., Аржанов М.М., Мохов И.И. Оценки изменения снежного покрова в Евразии по расчетам с глобальными климатическими моделями и данным наблюдений .....</u>                                                                                           | 83 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Переведенцев Ю.П.,</u> Исмагилов Н.В., Николаев А.А., Шанталинский К.М. <b>Сезонные перестройки циркуляции во внетропической зоне стратосферы в период 1979–2020 гг.</b> .....                                                                                                                                                                                            | 84 |
| <u>Платонов В.С.,</u> Варенцов М.И., Шестакова А.А., Бойко А.П., Дунцев С.А. <b>Модельный архив COSMO-CLM для Российской Арктики 1980–2016: технология создания, оценки качества воспроизведения приземных температуры воздуха и скорости ветра и перспективы дальнейших исследований</b> .....                                                                              | 85 |
| <u>Платонов В.С.,</u> Чернокульский А.В., Варенцов М.И., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. <b>Влияние московской агломерации на опасные атмосферные явления конвективного характера: результаты моделирования с высоким разрешением</b> .....                                                                                                                                          | 86 |
| <u>Ривин Г.С.,</u> Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Варенцов М.И., Кирсанов А.А., Чубарова Н.Е., Самсонов Е.Т., Шатунова М.В., Алферов Д.Ю., Алферов Ю.В., Быков Ф.Л., Воробьева Е.В., Горлач И.А. и др. <b>Система COSMO-Ru численного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: современное состояние и дальнейшее развитие</b> ..... | 87 |
| <u>Рябова С.А.</u> <b>Исследование мультифрактальности температуры на "Михнево"</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 88 |
| <u>Селезнев А.Ф.,</u> Мухин Д.Н. <b>Исследование взаимосвязей между температурой поверхности и теплосодержанием тропического Тихого океана по данным реанализа и климатических моделей (в контексте динамики явления Эль-Ниньо)</b> .....                                                                                                                                    | 89 |
| <u>Семенов В.А.</u> <b>Становится ли погода более нервной?</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 90 |
| <u>Серых И.В.,</u> Сонечкин Д.М. <b>Влияние изменений солнечной активности на Эль-Ниньо - Южное колебание и Антарктическое колебание как элементов Глобальной атмосферной осцилляции</b> .....                                                                                                                                                                               | 91 |
| <u>Собаева Д.А.,</u> Зюляева Ю.А. <b>Отклик динамики арктического стратосферного полярного вихря на крупномасштабные аномалии температуры поверхности Тихого океана в идеализированных модельных экспериментах</b> .....                                                                                                                                                     | 92 |
| <u>Степаненко В.М.,</u> Ломов В.А., Романенко В.А., Репина И.А., Горин С.Л. <b>Процедуры оценки будущих выбросов и поглощения углекислого газа и метана водными объектами суши</b> .....                                                                                                                                                                                     | 93 |
| <u>Сухановский А.Н.,</u> Васильев А.Ю., Попова Е.Н. <b>Лабораторное моделирование общей циркуляции атмосферы</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 94 |
| <u>Тарасевич М.А.,</u> Володин Е.М. <b>Оценка качества сезонных хиндкастов модели климата INMCM5, инициализированных анализом океана Гидрометцентра России</b> .....                                                                                                                                                                                                         | 95 |
| <u>Тимажев А.В.,</u> Мохов И.И. <b>Повторяемость зимних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультidesятилетней осцилляций</b> .....                                                                                                                                                   | 96 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>Толстых М.А.</u> , Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова С.В., Зарипов Р.Б., Гойман Г.С., Алипова К.А. <b>Развитие системы среднесрочного и долгосрочного прогноза на основе модели ПЛАВ</b> .....                                                                                                                                                                                      | 97  |
| <u>Фадеев Р.Ю.</u> , Толстых М.А., Шашкин В.В. <b>О некоторых усовершенствованиях в глобальной модели атмосферы ПЛАВ</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 98  |
| <u>Фейгин А.М.</u> , Гаврилов А.С., Кравцов С.В., Буянова М.Н., Мухин Д.Н., Лоскутов Е.М. <b>Выделение мод вынужденной и собственной изменчивости в климатических моделях по ансамблю реализаций</b> .....                                                                                                                                                                             | 99  |
| Хуторова О.Г., <u>Маслова М.В.</u> , Хуторов В.Е., Корчагин Г.Е. <b>Мониторинг атмосферы с помощью ГНСС приемников и конвективные процессы</b> .....                                                                                                                                                                                                                                   | 100 |
| <u>Черненко А.Ю.</u> , Володин Е.М. <b>Модификация и верификация блока описания снежного покрова климатической модели ИВМ РАН</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                | 101 |
| <u>Чернокульский А.В.</u> <b>Наблюдаемые изменения опасных атмосферных явлений конвективного характера в России</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                              | 102 |
| Чернокульский А.В., <u>Шихов А.Н.</u> <b>Ветровалы в лесной зоне Сибири в 2001-2022 гг. и вызывающие их метеорологические явления</b> .....                                                                                                                                                                                                                                            | 103 |
| Чернокульский А.В., <u>Шихов А.Н.</u> , Ярынич Ю.И., Спрыгин А.А. <b>Эмпирические зависимости между характеристиками конвективных штормов, вызывающих смерчи и шквалы, сигнатурами на верхней границе облаков и конвективными параметрами в Северной Евразии</b> .....                                                                                                                 | 104 |
| <u>Шашкин В.В.</u> , Гойман Г.С. <b>Перспективная глобальная модель динамики атмосферы</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 105 |
| <u>Шерстюков Б.Г.</u> , Шерстюков А.Б. <b>Колебательная система климата, антропогенные и природные изменения в климатической системе</b> .....                                                                                                                                                                                                                                         | 106 |
| <u>Антохина О.Ю.</u> , Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. <b>Крупномасштабная циркуляция атмосферы над Азией в периоды формирования экстремально высокой приземной концентрации озона в Западной Сибири</b> ..... | 107 |
| <br><i>Секция IV. Состав атмосферы и перенос примесей</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
| Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., <u>Белан Б.Д.</u> , Белан С.Б., Гурулева Е.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K., Рассказчикова Т.М., Paris J.-D., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н. <b>Особенности распределения метана над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 года</b> .                                    | 108 |
| <u>Артамонова М.С.</u> , Лапченко В.А., Максименков Л.О., Чхетиани О.Г., Иорданский М.А. <b>Экспериментальные исследования аэрозоля в Крыму весной 2020 г</b> .....                                                                                                                                                                                                                    | 109 |
| <u>Балугин Н.В.</u> , Фомин Б.А., Юшков В.А. <b>Возможности многоканальных оптических зондов обратного рассеяния для баллонных исследований аэрозольного состава средней атмосферы</b> .....                                                                                                                                                                                           | 110 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <u>Беляев А.Н., Николайшвили С.Ш., Омельченко А.Н., Полуаршинов М.А., Платов Ю.В., Смирнов Ю.В., Страхов А.В. Аэрозольный слой в нижней термосфере .....</u>                                                                                                                                     | <u>111</u> |
| <u>Березина Е.В., Васильева А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В., Беликов И.Б. Анализ измерений СН<sub>4</sub> и δ13C в г. Москве в 2018-2020 гг. ....</u>                                                                                                                                      | <u>112</u> |
| <u>Боровский А.Н., Груздев А.Н., Елохов А.С., Постыляков О.В., Никитин С.В., Фатихов К.А., Шамсутдинов Д.Р., Бручковский И.И., Кирсанов А.А., Садовников С.А., Чуличков А.И. Измерения состава атмосферы методом дифференциальной спектроскопии на сети станций ИФА им.А.М.Обухова РАН .....</u> | <u>113</u> |
| <u>Виноградова А.А., Гинзбург А.С., Лезина Е.А., Помелова М.А. Изменчивость содержания кислорода в атмосфере Москвы по измерениям ГПБУ «Мосэкомониторинг» .....</u>                                                                                                                              | <u>114</u> |
| <u>Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Губанова Д.П. Межгодовые, сезонные и суточные вариации содержания метана в приземном воздухе Москвы .....</u>                                                                                                                                                | <u>115</u> |
| <u>Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Семутникова Е.Г., Гушин Р.А., Даценко О.И. Вариации радиационных характеристик аэрозоля при крупномасштабных задымлениях атмосферы .....</u>                                                                                                       | <u>116</u> |
| <u>Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Даценко О.И., Гушин Р.А., Пономарева Т.Я., Горчакова И.А. Смоги и пыльная мгла на Северной Китайской Равнине в 2019-2022 гг.....</u>                                                                                                               | <u>117</u> |
| <u>Гречушников М.Г., Кравчук М.В. Сравнение результатов натурных измерений эмиссии метана с разнотипных водохранилищ РФ с данными Global Maps of Methane Emissions .....</u>                                                                                                                     | <u>118</u> |
| <u>Груздев А.Н., Елохов А.С. Многолетние тренды содержания NO<sub>2</sub> в стратосфере и тропосфере по результатам наземных и спутниковых (прибор OMI) измерений .....</u>                                                                                                                      | <u>119</u> |
| <u>Груздев А.Н., Елохов А.С. Сопоставление результатов многолетних измерений содержания NO<sub>2</sub> с помощью спутникового прибора OMI с данными наземных измерений .....</u>                                                                                                                 | <u>120</u> |
| <u>Губанова Д.П., Виноградова А.А., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Иорданский М.А. Приземный аэрозоль в Москве: фоновый уровень и эпизоды экстремального загрязнения атмосферы.....</u>                                                                                                           | <u>121</u> |
| <u>Губанова Д.П., Садовская Н.В., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Разнообразие форм и состава аэрозольных частиц в приземной атмосфере Москвы вблизи сильного локального антропогенного источника .....</u>                                                                     | <u>122</u> |
| <u>Еланский Н.Ф. Национальная система мониторинга состава атмосферы: актуальные проблемы и возможные пути их решения .....</u>                                                                                                                                                                   | <u>123</u> |
| <u>Жданова Е.Ю., Полухов А.А., Чубарова Н.Е. Аэрозольная оптическая толщина в Московском регионе по спутниковым данным и ее влияние на расчет радиационных и метеорологических параметров в модели COSMO-RU.....</u>                                                                             | <u>124</u> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>Казанцев В.С., Кривенок Л.А., Ломов В.А., Гинзбург А.С.</u> <b>Оценки летней эмиссии парниковых газов из водохранилищ Ангарского каскада</b> .....                                                                                                                                   | 125 |
| <u>Казанцев В.С., Кривенок Л.А., Ломов В.А., Гинзбург А.С.</u> <b>Методические особенности оценки весеннего выброса парниковых газов из Братского водохранилища</b> .....                                                                                                               | 126 |
| <u>Казанцев В.С., Кривенок Л.А., Ломов В.А., Гинзбург А.С.</u> <b>Влияние гидрометеорологических факторов на удельные потоки парниковых газов из водохранилищ Ангарского каскада</b> .....                                                                                              | 127 |
| <u>Киселева Ю.В., Рублев А.Н., Голомолзин В.В.</u> <b>Оценка общего содержания озона и углекислого газа по спутниковым измерениям в ИК области спектра</b> .....                                                                                                                        | 128 |
| <u>Копейкин В.М., Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И., Бунтов Д.В.</u> <b>Экспериментальные исследования электризации ветропесчаного потока</b> .....                                                                                                                  | 129 |
| <u>Кочин А.В.</u> <b>Исследование радиационных процессов в атмосфере радиозондом с оптическим датчиком</b> .....                                                                                                                                                                        | 130 |
| <u>Кременчуцкий Д.А., Батраков Г.Ф.</u> <b>Поток бериллия-7 из атмосферы в г. Севастополь</b> .....                                                                                                                                                                                     | 131 |
| <u>Куликов М.Ю., Беликович М.В., Чубаров А.Г., Дементьева С.О., Фейгин А.М.</u> <b>Восстановление ночных распределений О и Н на высотах мезосферы – нижней термосферы по данным спутниковых измерений</b> .....                                                                         | 132 |
| <u>Лоскутова М.А., Макштас А.П., Лаурила Т., Асми Э.</u> <b>Результаты непрерывных измерений метана на НИС Ледовая база «Мыс Баранова» в 2015 – 2020 гг.</b> .....                                                                                                                      | 133 |
| <u>Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.</u> <b>Звуковой фиксинг озона выноса</b> .....                                                                                                                                                                                                       | 134 |
| <u>Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С., Лебедев В.А.</u> <b>О вертикальном распределении пылевого аэрозоля в приземном слое</b> .....                                                                                                                                         | 135 |
| <u>Матешева А.В., Макоско А.А., Лысова О.В.</u> <b>О тенденциях риска для растительности АЗРФ от загрязнения атмосферы дальним переносом в условиях изменяющегося климата в 1980-2050 гг.</b> .....                                                                                     | 136 |
| <u>Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Скороход А.И., Белоусов В.А., Муравья В.О., Флинт М.В., Березина Е.В., Новигатский А.Н.</u> <b>Концентрация метана и значения <math>\delta^{13}\text{C}</math> в метане над арктическими морями летом и осенью по данным морских экспедиций</b> ..... | 137 |
| <u>Ракитин В.С., Груздев А.Н., Сафронов А.Н., Кириллова Н.С., Федорова Е.И., Елохов А.С.</u> <b>Валидация данных по тропосферному и стратосферному содержанию <math>\text{NO}_2</math> TROPOMI наземными измерениями спектрометра ЗНС ИФА РАН</b> .....                                 | 138 |
| <u>Ракитин В.С., Кириллова Н.С., Федорова Е.И., Сафронов А.Н., Казаков А.В., Джола А.В., Гречко Е.И.</u> <b>Валидация измерений общего содержания СО орбитального прибора TROPOMI данными наземных спектрометров ИФА РАН в Москве и Звенигороде</b> .....                               | 139 |

|                                                                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Сафронов А.Н. Пространственно-временная оценка влияния гроз на природные пожары в Австралии в 2017-2020 годах с использованием данных космических наблюдений ISS LIS и MODIS.....</b> | <b>140</b> |
| <b>Федорова Е.И., Лапченко В.А., Еланский Н.Ф., Скороход А.И. Изменчивость приземного озона в Карадагском природном заповеднике .....</b>                                                | <b>141</b> |
| <b>Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Кирсанов А.А., Ривин Г.С. Анализ и прогноз переноса продуктов горения природных пожаров в Москву в августе 2022 г. ....</b>                               | <b>142</b> |
| <b>Шевченко В.П., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Стародымова Д.П. Роль эолового рассеянного осадочного вещества в процессах осадконакопления в Арктике и Северной Атлантике .....</b> | <b>143</b> |
| <b>Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Федорова Е.И. Влияние дальнего переноса воздушных масс на сезонные вариации приземного содержания метана в Арктике .....</b>             | <b>144</b> |

#### *Секция V. Физика пограничных слоев*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Галиченко С.В., Гурьев А.В., Климанова Е.В., Козьмина А.С., Прохорчук А.А. Электричество невозмущенного атмосферного пограничного слоя средних широт .....</b>                                                                                           | <b>145</b> |
| <b>Анисимов С.В., Галиченко С.В., Климанова Е.В., Афиногенов К.В., Прохорчук А.А. Результаты наземных и высотных наблюдений объемной активности радона в атмосферном пограничном слое .....</b>                                                                                             | <b>146</b> |
| <b>Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А. Эффекты аэрозольных частиц в электричестве атмосферного пограничного слоя .....</b>                                                                                                                                                        | <b>147</b> |
| <b>Артамонов А.Ю., Дмитриченко А.А., Дюкарев Е.А. Экспериментальное исследование потоков тепла, влаги и парниковых газов на грядово-мочажинном комплексе болотного стационара Мухрино .....</b>                                                                                             | <b>148</b> |
| <b>Баранов Н.А., Князев А.К., Миллер Е.А. Результаты анализа продолжительности радиационных инверсий от характеристик температурной стратификации в пограничном слое атмосферы .....</b>                                                                                                    | <b>149</b> |
| <b>Барсков К.В., Чечин Д.Г., Дрозд И.Д., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д., Гавриков А.В., Варенцов М.И., Степаненко В.М., Репина И.А. Связь вторых и третьих моментов в поверхностном слое при различных условиях стратификации над однородным полем и в условиях городского ландшафта .....</b> | <b>150</b> |
| <b>Богородский П.В., Борисик А.Л., Марченко А.В., Новиков А.Л., Ромашова К.В., Рыжов И.В., Сидорова О.Р., Фильчук К.В., Хаустов В.А. Формирование снежно-ледяного покрова озера Стемме (о. Западный Шпицберген) .....</b>                                                                   | <b>151</b> |
| <b>Бычкова В.И., Мортиков Е.В., Дебольский А.В. Влияние снежных частиц на характеристики турбулентности в приземном слое атмосферы .....</b>                                                                                                                                                | <b>152</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <u>Вазасева Н.В., Чхетиани О.Г.</u> <b>Характерные спектры субмезомасштабных структур по данным экспериментальных наблюдений .....</b>                                                                                                                                                                                           | <b>153</b> |
| <u>Варенцов А.И., Глазунов А.В., Мортиков Е.В.</u> <b>Численное моделирование турбулентного переноса примесей в идеализированной городской среде .....</b>                                                                                                                                                                       | <b>154</b> |
| <u>Варенцов М.И., Константинов П.И., Репина И.А., Глазунов А.В., Самсонов Т.Е., Степаненко В.М., Артамонов А.Ю., Дебольский А.В., Печкин А.С., Сорочин А.В., Эзау И.Н.</u> <b>Особенности пограничного слоя атмосферы над арктическим городом по данным экспериментальных наблюдений и вихреразрешающего моделирования .....</b> | <b>155</b> |
| <u>Галиченко С.В., Анисимов С.В., Прохорчук А.А., Климанова Е.В.</u> <b>Статистика турбулентных электрических переменных атмосферного пограничного слоя: результаты натурных наблюдений и численного моделирования .....</b>                                                                                                     | <b>156</b> |
| <u>Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Коленикова М.А., Володин Е.М.</u> <b>Улучшение параметризации устойчивого пограничного слоя атмосферы в модели INMCM5 .....</b>                                                                                                                                                               | <b>157</b> |
| <u>Дмитриев Э.М., Анисимов С.В.</u> <b>Динамика высотного распределения радона в пограничном слое атмосферы: математическое и численное моделирование ...</b>                                                                                                                                                                    | <b>158</b> |
| <u>Докукин С.А., Гинзбург А.С., Белова И.Н., Фалалеева В.А.</u> <b>Биоклиматические характеристики отопительного сезона .....</b>                                                                                                                                                                                                | <b>159</b> |
| <u>Дрозд И.Д., Варенцов М.И., Варенцов А.И., Степаненко В.М., Репина И.А., Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д.</u> <b>Учет термической неоднородности подстилающей поверхности при моделировании турбулентных потоков над болотными экосистемами.....</b>                                                                    | <b>160</b> |
| <u>Журавлев Р.В., Миллер Е.А., Лезина Е.А., Родина К.В.</u> <b>Настройка различных физических параметризаций модели WRF-ARW по измерениям характеристик инверсий температуры в планетарном пограничном слое над Москвой .....</b>                                                                                                | <b>161</b> |
| <u>Кузнецова А.М., Поплавский Е.И., Троицкая Ю.И.</u> <b>Численные эксперименты по выяснению механизма интенсификации атмосферного вихря над Баренцевым морем .....</b>                                                                                                                                                          | <b>162</b> |
| <u>Курганский М.В.</u> <b>Статистическое распределение атмосферных пыльных вихрей на Земле и на Марсе .....</b>                                                                                                                                                                                                                  | <b>163</b> |
| <u>Локощенко М.А.</u> <b>Ветровой режим над Москвой по многолетним данным акустического зондирования атмосферы.....</b>                                                                                                                                                                                                          | <b>164</b> |
| <u>Люлюкин В.С., Семенов Е.А., Ракитин В.С.</u> <b>Автоматическое определение высоты слоя перемешивания по данным содарного зондирования .....</b>                                                                                                                                                                               | <b>165</b> |
| <u>Люлюкин В.С., Чечин Д.Г., Варенцов М.И., Семенов Е.А., Зайцева Д.В., Артамонов А.Ю., Кузнецов Д.Д.</u> <b>Сопоставление методов оценки высоты слоя перемешивания в условиях устойчивой стратификации по данным локальных и дистанционных измерений параметров атмосферы .....</b>                                             | <b>166</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>Макштас А.П., Богородский П.В., Махотина И.А., Ежиков И.С.</u> Процессы энергообмена подстилающей поверхности с атмосферой и динамика протаивания верхнего слоя многолетней мерзлоты на о. Большевик в 2016 – 2021 гг. ....                                                                                                 | 167 |
| <u>Маркина М.Ю., Шармар В.Д.</u> Воздействие ветрового волнения на перемешивание в верхнем слое океана в Арктике в современном климате .....                                                                                                                                                                                   | 168 |
| <u>Пашкин А.Д., Репина И.А., Степаненко В.М., Богомолов В.Ю., Смирнов С.В., Тельминов А.Е.</u> Экспериментальные исследования формирования когерентных структур в городском каньоне в различные сезоны .....                                                                                                                   | 169 |
| <u>Пиваев П.Д., Кудрявцев В.Н., Reul N., Chapron B.</u> Отклик верхнего слоя океана на прохождение тропических циклонов. Наблюдения и моделирование .....                                                                                                                                                                      | 170 |
| <u>Плаксина Ю.Ю., Пуштаев А.В., Захаров К.Н., Руденко Ю.К., Винниченко Н.А., Уваров А.В.</u> Применение ИК-термографии и импульсного нагрева CO <sub>2</sub> лазером поверхности раздела «жидкость-газ» для определения её свойств .....                                                                                       | 171 |
| <u>Плахина И.Н., Репина И.А., Махоткин А.Н.</u> Анализ динамики составляющих радиационного баланса у подстилающей поверхности по данным актинометрической сети РФ .....                                                                                                                                                        | 172 |
| <u>Репина И.А., Пашкин А.В., Барсков К.В., Артамонов А.Ю.</u> Структура и динамика атмосферного пограничного слоя в прибрежной зоне .....                                                                                                                                                                                      | 173 |
| <u>Сидорова О.Р., Меркулов В.А., Ризе Д.Д., Богородский П.В.</u> Термодинамическая эволюция толщины припайного льда в прибрежной зоне пролива Шокальского зимой 2020-2021 г. ....                                                                                                                                              | 174 |
| <u>Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В.</u> Влияние крупно- и мелкомасштабных структур на турбулентную динамику вечернего перехода атмосферного пограничного слоя .....                                                                                                                                | 175 |
| <u>Фролькис В.А., Гинзбург А.С., Евсиков И.А.</u> Расчет антропогенного потока тепла на основе трехмерной модели зданий Санкт-Петербурга .....                                                                                                                                                                                 | 176 |
| <u>Чечин Д.Г., Репина И.А., Дюкарев Е.А., Артамонов А.Ю., Пашкин А.Д., Степаненко В.М., Варенцов М.А., Дрозд И.Д., Казанцев В.С., Ларина А.В., Шмонин К.Н., Бычкова В.И.</u> Исследование пространственной изменчивости характеристик тепло-, влаго- и газообмена над неоднородным болотным ландшафтом в Западной Сибири ..... | 177 |
| <u>Юшков В.П.</u> Потенциально доступная энергия и спектр флуктуаций давления в приземном слое атмосферы .....                                                                                                                                                                                                                 | 178 |

*Секция VI. Распространение и взаимодействие волн в атмосфере*

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>Гаврилов Н.М.</u> , Попов А.А., Далин П., Перминов В.И., Перцев Н.Н., Медведева И.В., Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Колтовской И.И. <b>Климатология коррелированных мезомасштабных возмущений вращательной температуры гидроксила вблизи мезопаузы</b> .....                                                                                                                                                   | 179 |
| <u>Горбунов М.Е.</u> , Доловова О.А. <b>Дробное преобразование Фурье и распределения в фазовом пространстве: приложение к анализу радиозатменных данных</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 180 |
| <u>Гурьянов В.В.</u> <b>Распространение волновых возмущений в восточном направлении в стратосфере и мезосфере в Южном полушарии в зимний период</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 181 |
| <u>Захаров В.И.</u> , Шалимов С.Л. <b>Возмущения нижней и верхней ионосферы, индуцированные тропическим циклоном Faxai 2019 г.</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 182 |
| <u>Колтовской И.И.</u> , Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Мордосова О.В., Мордовской П.Г. <b>Исследование внутренних гравитационных волн инфракрасной камерой всего неба над территорией Якутии</b> .....                                                                                                                                                                                                            | 183 |
| <u>Косяков С.И.</u> , <u>Куличков С.Н.</u> <b>Парадоксы волновых возмущений, формирующихся в атмосфере при импульсном выделении значительной энергии</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 184 |
| <u>Кочин А.В.</u> <b>Объемные колебания атмосферы</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 185 |
| <u>Куличков С.Н.</u> , Чунчuzов И.П., Попов О.Е., Горчаков Г.И., Мишенин А.А., Перепелкин В.Г., Буш Г.А., Скороход А.И., Виноградов Ю.А., Семутникова Е.Г., Šerić J., Медведев И., Гуцин Р.А., Копейкин В.М., Беликов И.Б., Губанова Д.П., Карп <b>Оценка энергии акустико-гравитационных волн Лэмба от извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай и проявление их воздействия на концентрации аэрозоля</b> ..... | 186 |
| <u>Курдяева Ю.А.</u> , Кшевецкий С.П. <b>Взаимосвязанная генерация акустических и внутренних гравитационных волн тропосферными источниками тепла</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 187 |
| <u>Кшевецкий С.П.</u> , Курдяева Ю.А. <b>Использование полей колебаний атмосферного давления для расчетов волн от метеорологических источников</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                           | 188 |
| <u>Медведева И.В.</u> , Ратовский К.Г., Толстиков М.В. <b>Межгодовые вариации температуры мезопаузы и максимума электронной концентрации по данным спектрометрических и радиофизических измерений в Восточной Сибири</b> .....                                                                                                                                                                                     | 189 |
| <u>Очиров А.А.</u> <b>О распространении поверхностных волн в невязкой экспоненциально стратифицированной жидкости</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 190 |
| <u>Очиров А.А.</u> , Чашечкин Ю.Д. <b>Волновые и сопутствующие высокоградиентные течения – лигаменты в вязкой непрерывно стратифицированной жидкости</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 191 |
| <u>Парников С.Г.</u> , Иевенко И.Б., Мордовской П.Г. <b>Волновая активность нижней термосферы по наблюдениям вариаций интенсивности ночной эмиссии 557,7 нм</b> .....                                                                                                                                                                                                                                              | 192 |
| <u>Рябова С.А.</u> , Шалимов С.Л. <b>Об атмосферных планетарных волнах на ионосферных высотах по данным обсерватории Москва</b> .....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 193 |

|                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <u>Теохаров А.Н.</u> Дисперсионные характеристики приводного (волноводного) атмосферного канала распространения радиолокационных сигналов .....                                                                                  | 194 |
| <u>Титов С.В.</u> , Николашкин С.В. Исследование температурного режима средней атмосферы Рэлеевским лидаром во время внезапных стратосферных потеплений в северо-восточной части Азии и зависимость от индексов КДК и ЭНЮК ..... | 195 |
| Чунчузов И.П., <u>Куличков С.Н.</u> , Попов О.Е., Перепелкин В.Г. Эволюция сигнала атмосферного давления от вулкана Тонга при удалении от него .....                                                                             | 196 |
| Степанов Р.А. Спектральный перенос энергии и энтропии в атмосфере по данным реанализа NCEP-CFSR.....                                                                                                                             | 197 |