9 785891 554863

ИФА

300 лет
Российская Академия Наук

VI Международная конференция,
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, 17–19 ноября 2026 г.

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

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

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

17 – 19 ноября 2026 года

Сборник тезисов

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

TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS

17-19 November 2026

Abstracts

МОСКВА
ФИЗМАТКНИГА
2026

ББК 26.23
Т 864
УДК 551.5

Редколлегия:
И.А. Репина, О.Г. Чхетиани, В.А. Семенов, В.А. Фалалеева, Ю.В. Киселева

Международная конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА». 17–19 ноября 2026 года. Сборник тезисов докладов. М.: Физматкнига, 2026 - 290 с.
ISBN 978-5-89155-486-3

The Conference dedicated to the memory of Academician Alexander Mikhailovich Obukhov "TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS" 17–19 November 2026. Book of Abstracts. Moscow. Fizmatkniga Publisher, 2026. 290 p.

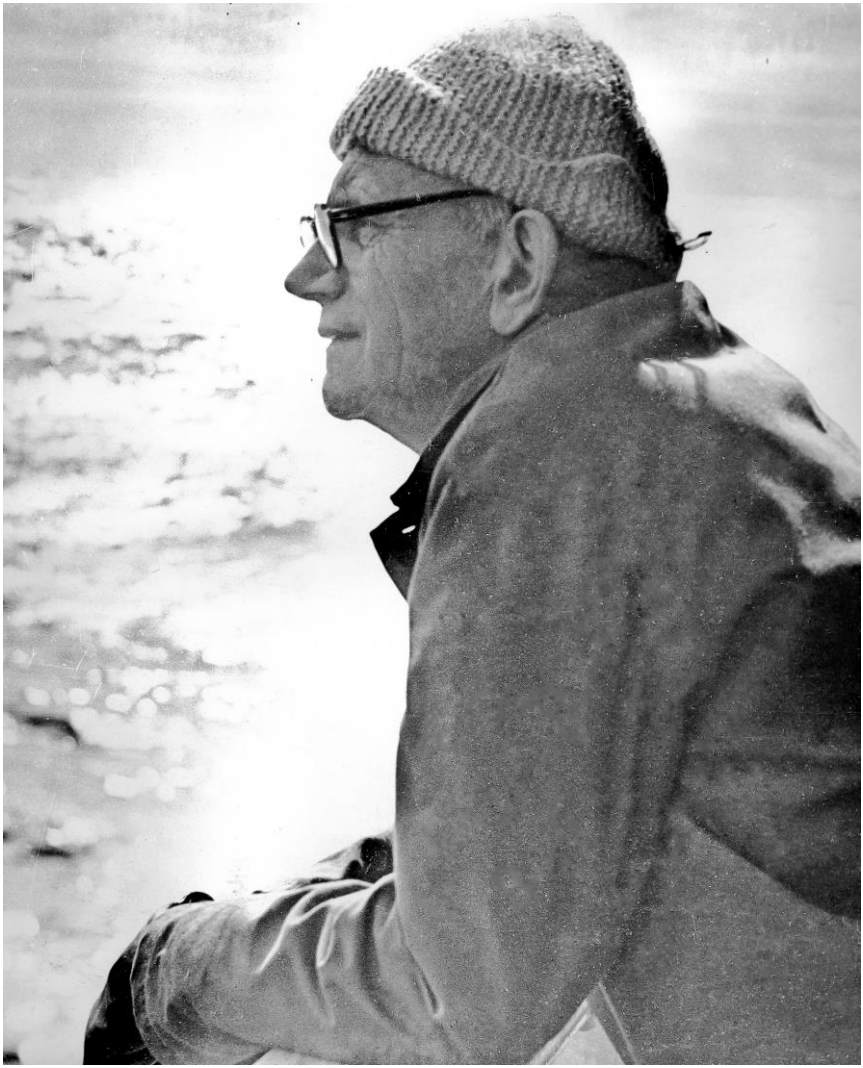
Научное издание

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

Международная конференция,
посвященная памяти академика
Александра Михайловича Обухова

17–19 ноября 2026 года

Сборник тезисов
Подписано в печать _____.
Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд.л. 13,0.
Тираж 200 экз.



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

Программный комитет

Председатель программного комитета:

Семенов Владимир Анатольевич, Академик РАН, ИФА РАН

Сопредседатель программного комитета

Чхетиани Отто Гурамович, д. ф.-м. н., ИФА РАН

Ученый секретарь:

Репина Ирина Анатольевна, д. ф.-м. н., Профессор РАН, ИФА РАН

Члены программного комитета:

Елисеев Алексей Викторович, д. ф.-м. н., Профессор РАН, ИФА РАН
Куличков Сергей Николаевич, д. ф.-м. н., ИФА РАН
Горчаков Геннадий Ильич, д. ф.-м. н., ИФА РАН
Курганский Михаил Васильевич, д. ф.-м. н., ИФА РАН
Горбунов Михаил Евреньевич, д. ф.-м. н., ИФА РАН
Макоско Александр Аркадьевич, Чл.-корр. РАН, РАН
Мареев Евгений Анатольевич, Академик РАН, ИПФ РАН
Чашечкин Юлий Дмитриевич, д. ф.-м. н., ИПМех РАН
Носов Михаил Александрович, д. ф.-м. н., МГУ
Лапшин Владимир Борисович, д. ф.-м. н., МГУ
Жмур Владимир Владимирович, Чл.-корр. РАН, ИОРАН
Степаненко Виктор Михайлович, д. ф.-м. н., МГУ
Толстых Михаил Андреевич, д. ф.-м. н., ИВМ РАН
Грицун Андрей Сергеевич, д. ф.-м. н., ИВМ РАН
Хан Валентина Моисеевна, д. ф.-м. н., Гидрометцентр
Ван Лин, Профессор, ИФА КАН

Организационный комитет

Сопредседатели Оргкомитета:

Семенов Владимир Анатольевич, Академик РАН, ИФА РАН
Чхетиани Отто Гурамович, д. ф.-м. н., ИФА РАН
Репина Ирина Анатольевна, д. ф.-м. н., ИФА РАН

Члены оргкомитета:

Сократова Ирина Николаевна, к. г. н., ОНЗ РАН
Кириллова Елена Эдуардовна, к. г. н., ОНЗ РАН
Романова Ольга Сергеевна, к. г. н., ОНЗ РАН
Куличков Сергей Николаевич, д. ф.-м. н., ИФА РАН
Чернокульский Александр Владимирович, к. ф.-м. н., ИФА РАН
Киселева Юлия Викторовна, к. ф.-м. н., ИФА РАН
Вазаева Наталья Викторовна, к. ф.-м. н., ИФА РАН
Фалалеева Виктория Александровна, ИФА РАН
Артамонов Арсений Юрьевич, ИФА РАН
Трубакова Каринэ Юрьевна, ИФА РАН
Пашкин Артем Денисович, ИФА РАН
Лищук Екатерина Алексеевна, ИФА РАН

Структурные функции квазидвумерной турбулентности в кольцевом канале при МГД-возбуждении

Благодатский И.Г.[1,2], Хапаев А.А.[2], Чхетиани О.Г.[2]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
blagodek03@gmail.com

Ключевые слова: *квазидвумерная турбулентность, МГД-генерация течений, вращающийся кольцевой канал, структурные функции, PIV, тонкий слой проводящей жидкости, лабораторное моделирование*

В работах ИФА РАН [1–3] экспериментально и численно изучается динамика квазидвумерной (КД) турбулентности, зональных течений и волн Россби в тонком слое проводящей жидкости, возбуждаемой МГД-методом во вращающихся кольцевых каналах. В качестве источника движения используется сила Ампера, возникающая при пропускании радиального электрического тока через слой электролита, помещённого над кольцевой конфигурацией постоянных магнитов на конической основе. Лабораторная установка: вращающийся цилиндрический сосуд со свободной поверхностью (внутренний радиус R1 = 5 см, внешний R2 = 18 см), слой H = 0.5 см 10%-го раствора $CuSO_4$ ток I = 100–900 мА. Поле скоростей восстанавливается PIV-методом [1].

Исследованы статистические характеристики турбулентного поля скорости с периодом вращения 10.2 сек при токе I = 900 мА с акцентом на пространственную структуру возмущений. Обработана серия из ~1248 PIV-кадров (25 кадр/с, сетка 176 × 176, масштаб скорости 0.071 см/с/пиксел). Поле скоростей интерполировалось на полярную сетку (Nr = 40, = 360, кольцо 14.5–17.8 см). Определены Vr и азимутальная компоненты. Вычислялись структурные функции второго порядка: продольная по радиусу $B_{rr}(\delta r) = \langle[\Delta V_r]^2\rangle$, продольная по азимуту $B_{\varphi\varphi}(s)$ при дуговом смещении $s = r\cdot\delta\varphi$, а также поперечная функция $B_{tt}(r)$: $B_{tt} = (1/2r)\cdot d[r^2 B_{rr}]/dr$ [4]. $B_{rr}(r)$ демонстрирует степенную зависимость $\sim r^{\alpha}$ на диапазоне масштабов ~0.2–2 см.

Рассчитанные структурные функции качественно согласуются с предсказаниями теории КД-турбулентности [4] и более ранними измерениями. Разработанный в Wolfram Mathematica программный комплекс обеспечивает автоматическую обработку больших серий PIV-кадров: полярную интерполяцию полей скорости, вычисление структурных функций и определение степенных зависимостей. Это открывает возможность систематического сравнения характеристик КД-турбулентности при различных режимах вращения и значениях тока возбуждения.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, №23–17–00273.

Литература

1. Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г. Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. № 6. С. 359–365.
2. Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 6. С. 661–673.
3. Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 4. С. 493–506.
4. Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 2. С. 208–222

Воздействие жидких осадков на характеристики турбулентности и типы стратификации приземного слоя атмосферы

Богушевич А.Я., Багинский В.В., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Мирсанов М.А., Тельминов А.Е.
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
alexey-kobzev@mail.ru

Ключевые слова: *приземный слой атмосферы, турбулентные характеристики, ультразвуковые измерения, осадки, стратификация, корреляционный анализ, матрица переходов*

Турбулентность приземного слоя атмосферы определяет распространение оптических и акустических волн, а также работу систем дистанционного зондирования. Её эволюция удовлетворительно описывается теорией подобия Монина–Обухова [1, 2], однако выпадение жидких осадков нарушает стационарность процессов, кардинально меняя стратификацию за минуты. Влияние осадков на валидность теории изучено недостаточно [3], а полевых наблюдений эффекта дождя в пограничном слое мало.

Измерения проводились в летние периоды на территории Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (г. Томск). Турбулентные характеристики измерялись ультразвуковой метеостанцией, осадки — оптическим осадкомером, солнечная радиация — пиранометром. Рассматривались эпизоды с осадками и контрольные эпизоды без осадков.

Показано, что осадки нарушают связь солнечной радиации с температурными флуктуациями. Это согласуется со сменой механизмов генерации турбулентности: радиационно-конвективный вклад уменьшается, а динамический, связанный с ветром и нисходящими потоками, становится преобладающим. Выделены три типовых сценария отклика турбулентных характеристик: уменьшение солнечной радиации при облачности без осадков, дневные кратковременные ливни и ночные осадки.

Обобщение всех рассмотренных эпизодов показало, что осадки в половине случаев стабилизируют приземный слой, подавляя как дневную конвекцию, так и ночные инверсии. Наиболее характерны переходы из неустойчивой и устойчивой стратификации в безразличную. При этом часть эпизодов сохраняет исходный тип стратификации, что указывает на гистерезис турбулентного режима из-за увлажнения и охлаждения поверхности. Полученные результаты указывают на необходимость учёта выявленных эффектов при параметризации турбулентности в численных моделях прогноза погоды, особенно в переходные фазы суток и в периоды ливневых осадков.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 25-27-00376, https://rscf.ru/project/25-27-00376/).

Литература

1. Монин, А. С. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы / А. С. Монин, А. М. Обухов // Труды Геофизического института АН СССР. – 1954. – № 24 (151). – С. 163–187.
2. Foken, T. Micrometeorology / T. Foken. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 2017. – 428 p.
3. Bolek, A. Rainfall Effects on Atmospheric Turbulence and Near-Surface Similarities in the Stable Boundary Layer / A. Bolek, F. Y. Testik // Boundary-Layer Meteorology. – 2024. – Vol. 190. – Art. 32.

Чувствительность расчётов океана и морского льда для Баренцева моря к схемам вертикального турбулентного перемешивания в ROMS–CICE

Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г.
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия
nikita.butakov.2019@mail.ru

Ключевые слова: *Баренцево море, моделирование океана, морской лёд, ROMS–CICE, вертикальное турбулентное перемешивание, параметризации турбулентности, чувствительность модели*

Проведено сравнение параметризаций вертикального турбулентного перемешивания в связанной модели ROMS–CICE для Баренцева моря за 1–8 января 2025 г. Рассмотрены схемы параметризации вертикального турбулентного перемешивания LMD/KPP [1], GLS k–ε, GLS k–ω [2] и Mellor–Yamada уровня 2.5 [3]. В основных экспериментах фоновый коэффициент вертикальной вязкости составлял 10^{-3} м²/с; дополнительно выполнен расчёт LMD с 10^{-5} м²/с. Начальные, граничные и атмосферные условия, приливной форсинг TPXO и настройки ледовой модели сохранялись одинаковыми.

Оценки получены по температуре поверхности OSTIA, концентрации и кромке льда OSI SAF и Norwegian Ice Service, 48-часовому дрейфу OSI SAF, контактным измерениям температуры, солёности и течений, а также часовым рядам десяти мареографов. Оценивались ошибки скалярных величин, модуля скорости и направления течений.

Средний по датам RMSE температуры поверхности составил 0.557–0.575 °C. MY25 дал меньшую среднюю ошибку SST и концентрации льда, тогда как LMD лучше согласовался с температурой верхних 20 м по контактным измерениям и 48-часовым дрейфом. На седьмые сутки RMSE SST равнялся 0.589 °C для LMD, 0.603 °C для MY25, 0.639 °C для k–ε и 0.656 °C для k–ω. Во всех вариантах средний модуль течений был занижен.

Снижение фоновой вязкости в LMD в 100 раз изменило основные средние ошибки по всей области менее чем на 0.02%; изменение площади льда к концу расчёта составило около 39 км². В данном зимнем эпизоде чувствительность оценок к выбору схемы оказалась выше, чем к фоновому коэффициенту вязкости в LMD.

Литература

1. Large W.G., McWilliams J.C., Doney S.C. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. Rev. Geophys. 1994. 32. 363–403.
2. Umlauf L., Burchard H. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. J. Mar. Res. 2003. 61(2). 235–265.
3. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. 1982. 20(4). 851–875.

Крупномасштабная турбулентность атмосферного пограничного слоя: статистические закономерности и асимметрия субмезомасштабных структур

Вазаева Н.В.[1,2], Чхетиани О.Г.[1], Крамар В.Ф.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
vazaevanv@ifaran.ru

Ключевые слова: *атмосферный пограничный слой, крупномасштабная турбулентность, субмезомасштабные структуры*

Субмезомасштабные когерентные вихревые структуры, стрики (С.), постоянно существуют в АПС со значительным вертикальным сдвигом скорости ветра. С. относят к крупномасштабной турбулентности, а их образование связывают с развитием немодальных возмущений в стратифицированном экмановском слое. Данные об их масштабах и динамических характеристиках представляют большой интерес. Масштаб находится в «серой зоне» атмосферных моделей, явный учет С. при численном моделировании требует разработки и усовершенствования существующих схем параметризаций АПС. Для этого возможно три принципиальных подхода к получению данных: детальный анализ характеристик С. простыми двухпараметрическими моделями; получение статистических закономерностей при непосредственной дистанционной регистрации С. минисодарам высокого разрешения в приземном слое, где ранее акустическое зондирование ограничивалось техническими возможностями; исследование турбулентных характеристик и спектров известных частных случаев С. по результатам наблюдений и расчетов атмосферных моделей со стандартными параметризациями.
По двухпараметрической модели развития С., с учетом и без учета температурной составляющей, оценены их масштабы в АПС, 100-200 м по вертикали и 300-600 м по горизонтали, проведено сравнение с другими когерентными структурами, зафиксирована их асимметрия и ориентация в пространстве. Эти результаты получались на безразмерной сетке в виде пространственных распределений продольной компоненты скорости для расчетного момента времени, соответствующего максимальному значению безразмерной энергии в модели оптимальных возмущений. Подобные масштабы характерны и для экспериментальных данных о структуре поля ветра в нижней части АПС в летний период 2017-2019 гг. на ЦНС. Для ряда частных случаев проведено численное моделирование в модели WRF-LES; построены энергетические спектры с наклоном -1 и -5/3; оценено значение плотности спиральности в 0,5-4 м/с^2.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 25-17-00346).

Теория локального подобия, включающая спектральный путь перемешивания Прандтля и второй момент вертикальной скорости. Приложение к турбулентности в конвективных пограничных слоях атмосферы и океана

Вульфсон А.Н.[1,2], Николаев П.В.[3]
[1]*Институт водных проблем РАН, Москва, Россия*
[2]*НИУ "Высшая школа экономики", Москва, Россия*
[3]*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*
longines1812@yandex.ru

Ключевые слова: *конвективный пограничный слой, Теория локального подобия, «Спектральный» путь перемешивания, Полуэмпирические теории турбулентности Прандтля, Ричардсона-Онзагера, Хана и Тейлора*

В настоящей работе для описания горизонтально усредненных параметров турбулентности конвективных пограничных слоев атмосферы и океана использована модифицированная система уравнений Буссинеска, включающая плавучесть вместо флуктуации температуры. Аппроксимации горизонтально усредненных параметров турбулентности выполнены на основе нового варианта локальной теории подобия, использующей понятия полуэмпирической теории турбулентности Прандтля. Поэтому эти аппроксимации строятся на основе теории размерности в форме обобщённых одночлёнов, зависящих от базовых параметров, включающих второй момент вертикальной скорости $\overline{w^2}$ и «спектральный» путь перемешивания Прандтля l_{PS}. Такой подход позволяет выразить коэффициент турбулентного обмена, диссипацию кинетической энергии турбулентности, а также смешанные моменты плавучести и вертикальной скорости, только через два независимых «базовых» параметра $\overline{w^2}$ и l_{PS}. В работе рассмотрено сопоставление предложенной аппроксимации с другими известными вариантами теории локального подобия. Кроме того, показано, что во всём конвективном пограничном слое водной и воздушной среды аппроксимации теории локального подобия для коэффициента турбулентного обмена и диссипации кинетической энергии согласованы с соотношениями известных полуэмпирических теорий Прандтля, Ричардсона-Онзагера и Хана, а также с теорией Тейлора. Соответствие экспериментальным данным в воздушной и водной средах, а также результатам численного моделирования позволяет утверждать, что все вертикальные профили безветрового конвективного слоя зависят только от двух базовых параметров $\overline{w^2}$ и l_{PS} и убедительно демонстрирует справедливость новой предложенной теории локального подобия. Основные результаты теории опубликованы в работах [1 – 4].

Литература

1. Vulfson A. N., Nikolaev P. V. L // Journal of the Atmospheric Sciences. 2022. Т. 79, № 1. С. 101–118.
2. Vulfson A. N., Nikolaev P. V. // Physics of Fluids. 2024. Т. 36, № 2. С. 026612.
3. Vulfson A. N., Nikolaev P. V. // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2024. Т. 60, № 1. С. 48–58.
4. Vulfson A. N., Nikolaev P. V. // Physics of Fluids. 2026. Т. 38, № 4. С. 045143.

Структура ветропесчанного потока и механизмы сальтации

Горчаков Г.И., Гущин Р.А., Карпов А.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gengor@ifaran.ru

Ключевые слова: *ветропесчаный поток, сальтация, пылевой аэрозоль, электродинамическая сальтация, турбулентные потоки*

На песчаных опустыненных территориях при скоростях ветра выше критической возникает ветропесчаный поток (от поземки до песчаной бури). Его структура характеризуется зависимостями от высоты Z, счётных N(z) и массовых M(z) концентрации сальтирующих частиц или горизонтальным массовым потоком F(z). Согласно Багнольду и результатам последующих исследований интегральный поток $Q=\int F(z)dz$ можно оценить с помощью эмпирических зависимостей от скорости ветра на заданной высоте или по динамической скорости. В ограниченном диапазоне высот профили F(z), M(z) или N(z) можно аппроксимировать экспонентами с определённым масштабом высоты или логарифмического градиента. В более широких диапазонах высот применимы кусочно-экспоненциальные аппроксимации.

Нами показано, вертикальные распределения в основном слое сальтации могут быть представлены двумя экспоненциальными сегментами с точкой излома на высоте примерно 2 до 4 см и с масштабами высоты слабо зависящими от динамической скорости. Выше основного слоя сальтации наблюдается слой с сильной зависимостью масштаба высоты от динамической скорости.

Траекторный анализ в нижнем миллиметровом слое сальтации позволил выделить две моды сальтирующих частиц, которые можно рассматривать как низкоскоростную и высокоскоростную.

Исследование электрических процессов в ветропесчаном потоке показало, что в ветропесчаном потоке возникают условия для электрического пробоя, который обусловлен коронными микроразрядами на подстилающей поверхности. Установлено, что при микроразрядах возможно появление высокоскоростных (скорость больше 1 м/с) сальтирующих частиц. Отсюда следует, что верхняя часть основного слоя сальтации формируется электродинамической сальтацией, а нижняя – классической (аэродинамической) сальтацией.

При электродинамической сальтации процесс эмиссии пылевого аэрозоля в ветропесчаном потоке существенно отличается от общепринятого присущего при классической сальтации.

Летающая лаборатория на базе планера для исследования конвективных потоков и проверки моделей автономного парения БВС

Гритчин Д.М.[1], Ежов А.Д.[1,2], Янышев Д.С.[1,2]
[1]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
gritchin3652@gmail.com

Ключевые слова: *летающая лаборатория, конвективный пограничный слой, восходящие потоки, бортовые измерения, автономное парение, наблюдаемость, рекуррентная нейронная сеть*

Конвективные потоки позволяют планеру набирать высоту без энергии. Моделирование выявляет полезные для парения признаки, но для реального аппарата нужно определить, какие доступны бортовым измерениям. Цель — летающая лаборатория и проверка признаков модели управления.

LSTM обучалась на полях конвективного пограничного слоя с разрешением 21–33 м. На траекториях 500 с набор высоты достигнут в 40% случаев против 3% при пассивном планировании; столкновения снизились со 116 до 36 из 500. Δw дала 21% вклада, со сглаженной компонентой — 29%. Это для планера 2 кг. Вопрос натурного этапа: сохраняются ли признаки при реальных датчиках.

Комплекс: планер F5J, Matek H743-WING V3 с ArduPilot, Raspberry Pi 5. Контроллер получает GNSS RushFPV M10 и ASPD-4525. Raspberry Pi пассивно пишет MAVLink и дополнительные каналы: энкодер AS5600 на флюгере, BMP280, два SHT35, BMM350.

Журналы контроллера и Raspberry Pi объединяются на общей шкале. Сохраняются сырые данные, калибровки, конфигурация, масса, положение датчиков, отметки пилота. В полётах — пересечения потоков и маневрирование. Скорость воздуха оценивается по разности скоростей относительно земли и воздуха с учётом ориентации и угла атаки; дополнительно — по изменению полной энергии с поправкой на снижение. Определяются ошибки, задержка, применимость.

Особое внимание Δw. Скорость на законцовках не измеряется; интерполяция поля 21–33 м требует проверки разрешения. Сначала сопоставят расчётный Δw, бортовые признаки и отклик. Калибровка нужна для восстановления ветра; время отклика датчиков учитывается в модели измерений.

Летающая лаборатория связывает численное исследование парения с экспериментом: определяет наблюдаемость и неопределённость признаков, создаёт натурный набор данных и проверяет обученную политику без передачи управления. Модель измерительных ошибок вернётся в расчётную среду для оценки устойчивости.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-17-00346.

Литература

1. Reddy G. и др. // Nature. — 2018. — Vol. 562, No. 7726. — P. 236–239.
2. Wildmann N. и др. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. — 2021. — Vol. 38, No. 4. — P. 921–935.
3. Segales A. R. и др. // Atmospheric Measurement Techniques. — 2022. — Vol. 15. — P. 2607–2621.
4. Maronga B. и др. // Boundary-Layer Meteorology. — 2013. — Vol. 148, No. 1. — P. 1–30.

Моделирование вертикальных распределений постоянной структурной функции флюктуаций показателя преломления воздуха в тропосфере и стратосфере по данным стандартного радиозондирования

Емекеев И.А., Струнин М.А.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
emekeev.ia@phystech.edu

Ключевые слова: *турбулентность, моделирование, структурная функция, атмосфера, самолетные измерения*

Для обеспечения работы оптических устройств сверхвысокого разрешения, осуществляющих наблюдения за земной поверхностью с космических аппаратов или наземных астрономических телескопов, необходима модель вертикального распределения в атмосфере показателя структурной функции флуктуаций оптической плотности воздуха (СФП). В работе анализируются различные методы и алгоритмы расчёта постоянной структурной функции пульсаций температуры воздуха (СФТ) в турбулентной атмосфере по самолётным данным, в том числе и при отклонении наклона мелкомасштабной части структурной функции от закона Обухова «2/3». Анализируются различные алгоритмы линейной аппроксимации СФТ в области мелкомасштабных пульсаций температуры. Получены вертикальные профили постоянной СФТ для шести дней самолётных наблюдений при различных условиях устойчивости в атмосфере и показано их соответствие с профилями скорости выравнивания температурных неоднородностей в атмосфере.

Кратко изложен метод определения постоянной СФП по пульсациям температуры воздуха с использованием самолётных данных. В качестве параметра для моделирования вертикального распределения показателя предложена локальная конвективная температура, в то время как локальная температура трения давала неудовлетворительный результат.

Описывается метод определения локальной конвективной температуры по данным стандартного радиозондирования атмосферы. Валидация метода осуществлялась по данным, полученным с помощью самолёта-лаборатории Як-42Д «Росгидромет». Метод позволяет построить модель вертикального распределения постоянной СФП в атмосфере вплоть до высот подъёма радиозонда – до 30 км. Важно, что метод не требует проведения специальных дополнительных измерений, поскольку основывается целиком на данных Глобальной сети радиозондирования Всемирной службы погоды, находящихся в открытом доступе.

Исследование авиационной турбулентности по реальным данным и возможности ее воспроизведения с использованием реанализа и модели численного прогноза погоды

Иванова А.Р., Комаськo Н.И., Скриптунова Е.Н.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
ivanova@mecom.ru

Ключевые слова: *турбулентность, бортовые сообщения AIREP Special, индексы турбулентности, фронтогенетическая функция*

Авиационная турбулентность – неофициальное общее название всех видов турбулентности, влияющей на полеты воздушных судов. Для ее прогнозирования для метеорологического обслуживания авиации, как правило, используют известные индексы турбулентности, а успешность прогноза определяют по сравнению прогностических расчетов с расчетами по начальным данным модели. Более корректное сравнение – с фактической регистрацией турбулентности – стало доступно сравнительно недавно, с созданием и накоплением архива сводок специальных бортовых наблюдений AIREP Special, содержащих информацию об опасных для авиации явлениях в полете над территорией России и их интенсивности.

За период 2021-2026 гг. было выбрано 2119 сообщений AIREP Special об умеренной и сильной турбулентности, совпадающей по срокам (в пределах ±15 мин) с основными расчетными сроками 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ и зарегистрированной на эшелонах полетов вблизи стандартных изобарических уровней (±150 м).

Был произведен расчет некоторых индексов турбулентности по данным реанализа ERA5. Это позволило определить распределение повторяемости, подтверждённое реальными данными, а анализ условных вероятностей с использованием формулы Байеса – уточнить пороговое значение для разделения случаев наличия и отсутствия турбулентности умеренной и сильной интенсивности.

Исследование case-study 24 ноября 2024 г., когда при полете над центральной частью Европейской территории России в слое 6 700 – 12 500 м (эшелоны полета FL220-FL410) отмечалась умеренная турбулентность, связанная с периферией струйного течения, подтвердило успешность предложенного подхода. Было установлено, что глобальная модель численного прогноза погоды ПЛАВ10 удовлетворительно воспроизводит процессы, приводящие к возникновению турбулентности, оказывающей влияние на полеты воздушных судов, над территорией Российской Федерации. Все индексы турбулентности, рассчитанные по ее выходным данным, оказались в градациях, свидетельствующих о наличии опасного явления.

Сопоставление параметризаций вертикального турбулентного обмена в одномерной модели Чёрного моря

Казаков Д.А., Чухарев А.М., Мизюк А.И.
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
dk@mhi-ras.ru

Ключевые слова: *вертикальное перемешивание, турбулентность, одномерная модель, параметризация турбулентности, сопоставление моделей, босфорский плюм, neto, oceananigans*

Моделирование вертикального обмена в Чёрном море существенно зависит от выбора параметризации турбулентности, однако сравнительная оценка различных схем на единых натурных данных до настоящего времени остаётся ограниченной. В работе на основе вычислительного ядра библиотеки Oceananigans.jl проведено сопоставление схем турбулентного замыкания, реализованных в 1D-задаче для Чёрного моря: Pacanowski-Philander (по числу Ричардсона), k-ε, TKE (CATKE), а также модели Чухарева [1] и Самодурова [2], учитывающих, соответственно, мелкомасштабные процессы в приповерхностном слое и вентиляцию глубоководных слоев босфорским плюмом. В качестве эталона использованы расчёты в системе NEMO 3.6. Сопоставление выполнено по данным CTD-зондирований в период весенне-осеннего сезона с оценкой ошибки воспроизведения температуры и солёности на различных диапазонах глубин. Показано, что различия между схемами наиболее заметны в приповерхностном слое и пикноклине. Существенный вклад волновых эффектов учитывается на границе раздела океана с атмосферой. Применение параметризации Самодурова [2] привело лишь к незначительному улучшению результатов. На глубине ниже холодного промежуточного слоя выбор замыкания влияет слабо. Полученные результаты позволяют рассматривать Oceananigans и разработанную модель как удобный инструмент сопоставления и уточнения параметризаций турбулентных процессов в океанологических задачах.

Литература

1. Чухарев, А. М. Модель турбулентности со многими временными масштабами для приповерхностного слоя моря / А. М. Чухарев // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.–2013.–Т. 49, № 4.–С. 477.
2. Самодуров, А. С. Стационарная модель вертикального обмена в Черном море для реальной геометрии бассейна / А. С. Самодуров, О. Е. Кульша, В. Н. Белокопытов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.–2006.–№ 14.–С. 517-523.

Методы идентификации конвективных структур

Калинин С.Д., Закиров М.Н., Малиновская Н.А., Козлов Н.О.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
fixinit8@yandex.ru

Ключевые слова: *конвекция, рэмпы, нейронные сети*

Конвективные движения в атмосфере, обеспечивающие перенос тепла и массы, оказывают значительное влияние на погоду и климат. Над нагретой поверхностью конвекция возникает в результате подъема теплого воздуха, движущей силой которого является турбулентный тепловой поток H:

$$H = \overline{\rho_a} C_p \overline{\omega' T'}$$

где $\overline{\rho_a}$ – плотность воздуха, C_p – удельная теплоемкость воздуха, $\overline{\omega' T'}$ – ковариация пульсаций вертикальной скорости и пульсаций температуры.

Ключевую роль в переносе тепла и мелкой пыли играют конвективные вихри, проявляющиеся во временных рядах в виде пилообразных всплесков разного масштаба – рэмпов. Они отражают параметры теплового потока.

Нами разрабатывались автоматизированные методы их идентификации.

Метод аппроксимации линейных участков.

Поскольку рэмпы близки по форме к несимметричным треугольникам, решалась задача аппроксимации участков ряда линейными функциями. Метод сочетает оптимизацию границ участков с генетическим алгоритмом (ГА) и быстрым вычислением линейной регрессии по аналитическим формулам МНК. Вводится функция потерь, включающая коэффициент детерминации, модуль углового коэффициента и длину интервала, что позволяет найти компромисс между качеством аппроксимации, выраженностью и длительностью тренда. ГА находит субоптимальные решения за приемлемое время.

Нейросетевой метод.

Данные усреднялись, проводилась нормализация методом максимума-минимума и преобразование в изображения. Нейросеть обучается распознавать три типа образов: «рэмп-вверх», «рэмп-вниз» и «НЕрэмп». Обучение включает формирование выборки, создание перцептрона, минимизацию ошибок методом обратного распространения и автоматическую классификацию новых данных.

Практическая значимость состоит в возможности автоматического анализа массивов экспериментальных данных: методы позволяют проводить статистику характеристик рэмпов, что даёт количественную оценку параметров теплового потока и интенсивности конвекции.

Исследования выполнены при поддержке РНФ, №25–17–00346.

Литература

1. Moustakis, Y., Onof, C.J. & Paschalis, A. Atmospheric convection, dynamics and topography shape the scaling pattern of hourly rainfall extremes with temperature globally // Commun Earth Environ 2020. Vol. 1. № 11. https://doi.org/10.1038/s43247-020-0003-0
2. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O.G., Azizyan G.V., Khapaev A.A.Convective structures of the near-surface air layer // Atmospheric and oceanic Optics. 2024. T. 37. № S1. C. S175- S182.

Изменчивость турбулентности ясного неба над Центральной частью Европейской территории России по данным реанализа высокого разрешения

Капустин Е.А.[1,2], Акперов М.Г.[2,3], Бокучава Д.Д.[4], Семенов В.А.[2,3], Чхетиани О.Г.[2,3], Вазаева Н.В.[2,3], Бабанов Б.А.[2,3]

[1]*НИУ "Высшая школа экономики", Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Российский университет транспорта, Москва, Россия*
[4]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
eakapustin@edu.hse.ru

Ключевые слова: *турбулентность ясного неба, число Ричардсона, струйное течение, режимы циркуляции атмосферы, изменение климата, Центральная европейская часть России*

В работе представлены результаты анализа изменчивости турбулентности ясного неба (ТЯН) над центральной частью Европейской территории России за период 1985–2024 гг. на основе данных регионального реанализа высокого разрешения CERRA (Copernicus European Regional Reanalysis). Для диагностики зон турбулентности в слое 200–250 гПа рассчитывалось отрицательное число Ричардсона (Ri), пороги категорий интенсивности ТЯН определены квантильным способом по объединенной выборке зимних и летних сроков калибровочного периода 1985–2004 гг. Показано, что подавляющая доля состояний атмосферы характеризуется значениями ниже порога «слабой» ТЯН (около 96,5 % зимой и 96,8 % летом), тогда как на «слабую» турбулентности приходится примерно 2,3 %, а суммарная повторяемость более интенсивных категорий не превышает 1,4 %. Повторяемость всех категорий ТЯН зимой выше, чем летом. Максимальная повторяемость ТЯН отмечается в западных и юго-западных районах региона, минимальная — на северо-востоке. Анализ выявил статистически значимый отрицательный тренд доли состояний ниже порога «слабой» ТЯН и положительные статистически значимые тренды остальных категорий ($p < 0,05$, тест Манна–Кендалла), за исключением «сильной», для которой тренд также положителен, однако статистически незначим. Пространственная локализация значимых трендов приурочена преимущественно к северо-западной части региона. Исследована связь изменчивости ТЯН с режимами атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом секторе (Североатлантическое колебание, Скандинавский блокинг, Атлантический гребень). Обнаружена сезонная инверсия отклика ТЯН на фазу Североатлантического колебания: зимой максимальная повторяемость ТЯН соответствует положительной фазе (САК+), летом — отрицательной (САК−). Инверсия объясняется положением оси струйного течения относительно области исследования в разные сезоны. Анализ выполнен за счет бюджетного финансирования в рамках работ по проведению прикладных научных исследований по государственному заданию № 103-00001-26-00 от 15.01.2026.

Связи скорости ветра и турбулентной энергии со структурой тензора напряжений Рейнольдса в приземном слое атмосферы

Козьмина А.С., Галиченко С.В., Анисимов С.В.
Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия
alina@borok.yar.ru

Ключевые слова: *приземный слой атмосферы, анизотропия турбулентности, тензор напряжений Рейнольдса, кинетическая энергия турбулентности*

Перенос и перемешивание в приземном слое атмосферы во многом определяются анизотропной природой турбулентности. В последние годы развивается подход, в котором анизотропия тензора напряжений Рейнольдса рассматривается как дополнительный параметр теории подобия приземного слоя [1–2]. Поэтому актуальна задача количественного описания структуры тензора и ее связи с метеорологическими факторами.

На основе 11 суточных серий минутных данных натурных наблюдений исследована эволюция анизотропных характеристик турбулентности. Определялись кинетическая энергия турбулентности (k), три барицентрические координаты анизотропии и их двумерное представление с помощью изометрического логарифмического преобразования отношений (ILR; z_1, z_2), а также угол θ_{3z} между собственной осью минимальной дисперсии и вертикалью.

Частичный ранговый анализ показал, что вертикальный турбулентный поток тепла после учета горизонтальной скорости ветра U_h сохраняет положительную связь с k, но не со структурными координатами анизотропии. При фиксированных k и потоке тепла увеличение U_h связано с уменьшением z_1 и z_2, тогда как при фиксированных U_h и потоке тепла увеличение k связано с ростом z_1 и z_2 и уменьшением θ_{3z}. Это указывает на различную структурную роль скорости ветра и величины турбулентной энергии.

Анализ конечных приращений и AR-инноваций подтвердил устойчивость этих связей после подавления медленного суточного хода и временной памяти рядов. Устойчивой направленной последовательности $U_h \rightarrow k \rightarrow$ анизотропия на лагах 1–60 мин не обнаружено: изменения проявляются преимущественно как синхронные или субминутные. Таким образом, скорость ветра и турбулентная энергия не являются взаимозаменяемыми характеристиками режима и по-разному связаны со структурой тензора напряжений Рейнольдса.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2025-0049.

Литература

1. Gucci F., Giovannini L., Stiperski I., Zardi D., Vercauteren N. (2023). “Sources of anisotropy in the Reynolds stress tensor in the stable boundary layer.” Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 149(750), 277–299. DOI: 10.1002/qj.4407.
2. Stiperski I., Calaf M. (2023). “Generalizing Monin–Obukhov Similarity Theory (1954) for Complex Atmospheric Turbulence.” Physical Review Letters, 130, 124001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.124001.

Вопросы корректной оценки размера атмосферных астрономических изображений

Копылов Е.А.[1], Одинцов С.Л.[2]
[1]*Институт астрономии РАН, Москва, Росссия*
[2]*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*
kopylov@inasan.ru

Ключевые слова: *астроклиматический мониторинг, DIMM-монитор, радиус когерентности, закон Колмогорова–Обухова «-5/3», наклоны спектров температуры, флуктуации показателя преломления, аналитические соотношения, астроклимат территории*

В задачах астроклиматического мониторинга перспективных пунктов астрономических наблюдений широко используется подход, основанный как на прямых оптических измерениях с помощью DIMM–мониторов, так и с помощью приземных измерений метеорологических параметров (например, ультразвуковыми метеостанциями) с последующим расчётом радиуса когерентности атмосферы r0 (параметр) оптических волн и размера (качества) полученных через турбулентную атмосферу изображений β0 (seeing). В докладе проведено сопоставление оценок β0, полученных непосредственно оптическими измерениями (DIMM), и расчётных значений, восстановленных по данным ультразвуковой метеостанции. При расчетах использовались формулы, в которых применяется закон «-5/3» Колмогорова–Обухова для наклонов спектров температуры (и флуктуаций показателя преломления) воздуха. Однако в процессе обработки экспериментальных данных было установлено, что закон «-5/3» является только частным случаем, входящим в более широкий диапазон наблюдавшихся наклонов спектров. Это приводит к выводу, что аналитические соотношения, основанные на законе «-5/3» и используемые для оценок r0 и β0, могут привести к значительным неточностям в оценках астроклимата исследуемой территории. Требуется разработать более корректный подход к формулировке аналитических соотношений, используемых для оценок r0 и β0.

Каскадная перемежаемость поля скорости диссипации по взаимной ковариации двух датчиков сдвига

Коржуев В.А., Чухарев А.М., Козлов И.Е.
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
korzhuev.vladimir@yandex.ru

Ключевые слова: *морская турбулентность, скорость диссипации, перемежаемость, уточненная гипотеза подобия, масштаб Озмидова, датчики сдвига, натурные измерения, пролив Карские Ворота*

Уточненная гипотеза подобия Колмогорова–Обухова [1, 2] связывает перемежаемость поля скорости диссипации ε с логарифмическим убыванием ковариации $\ln \varepsilon$ с расстоянием, $C(s) = \mu \ln(L/s)$, где μ – показатель перемежаемости. В стратифицированном океане инерционный интервал ограничен масштабом Озмидова LO [3], обычно дециметровым, а спектральная оценка ε по датчику сдвига [4] дает одно значение на окно 1–2 м. Поэтому каскадная перемежаемость скрыта внутри окна оценивания, и прямые оценки μ по полю ε в стратифицированных слоях редки.

Предложен способ ее измерения. Сигнал каждого датчика сдвига фильтруется в полосу турбулентных волновых чисел, и локальная дисперсия на окне 2,5 см дает полосовую оценку ε. Ковариация $\ln \varepsilon$ берется между датчиками, разнесенными на 2,4 см, и независимая погрешность каналов в нее не входит. Наклон по $\ln s$ в полосе $[15\eta; LO/3]$, где η – колмогоровский масштаб, оценивает μ.

Способ апробирован на измерениях зондом MSS60 в проливе Карские Ворота и Карском море (2023 г., 63 зондирования, из них 56 в проливе, 679 окон 1 м с числом Рейнольдса плавучести выше 400, LO = 0,88 м). Ковариация ниже LO убывает близко к логарифмическому закону, $\mu = 0{,}14$ [0,12; 0,16] при совместной подгонке. В Беринговом и Чукотском морях и Беринговом проливе (MSS90L, 2025 г.) тот же способ дает наклон 0,13–0,16 и совместную подгонку 0,13–0,15. При $LO/\eta \approx 500$ полоса подгонки занимает около декады, порог разрешения μ около 0,1, и отличие от опорного 0,20 не разрешается. Наклон в 4–5 раз превышает смещение способа (0,03 на поле без перемежаемости внутри окна). Масштаб вертикальной связности поля ε превышает LO примерно на порядок и растет вместе с ним.

Взаимная ковариация двух датчиков сдвига позволяет измерять каскадную перемежаемость в стратифицированном океане. Точность измерения ограничена шириной инерционного интервала, то есть числом Рейнольдса плавучести.

Работа выполнена в рамках государственного задания FNNN-2024-0001 и при поддержке гранта РНФ № 25-17-00309.

Литература

1. Kolmogorov A.N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence // J. Fluid Mech. 1962. V. 13. P. 82–85.
2. Obukhov A.M. Some specific features of atmospheric turbulence // J. Fluid Mech. 1962. V. 13. P. 77–81.
3. Gargett A.E., Osborn T.R., Nasmyth P.W. Local isotropy and the decay of turbulence in a stratified fluid // J. Fluid Mech. 1984. V. 144. P. 231–280.
4. Lueck R. et al. // Front. Mar. Sci. 2024. V. 11. 1334327.

Спектры турбулентности, генерируемые сингулярностями

Кузнецов Е.А.[1], Кочурин Е.А.[2]
[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*
kuznetso@itp.ac.ru

Ключевые слова: *сингулярности, спектры, турбулентности, волны на воде*

В докладе рассматривается проблема спектров турбулентности, порождаемых сингулярностями, случайно расположенными в пространстве на линиях и плоскостях. Показано, что частотный спектр смещений поверхности жидкости, обусловленных линейными сингулярностями, масштабируется как слаботурбулентный спектр Захарова–Филоненко:
$E(f) \sim f^{-4}$, где f - частота. При этом соответствующий спектр, зависящий от волновых векторов, может быть сильно анизотропным, как в спектре Филлипса. В изотропной ситуации спектр заметно отличается от формы Филлипса. Для сильно анизотропной двумерной гидродинамической турбулентности скачки вихревой составляющей могут генерировать степенное распределение Крайчнана. Для изотропного распределения спектр будет совпадать со спектром Саффмана. Для акустической турбулентности, генерируемой ансамблем случайно распределенных ударных волн, спектр имеет форму спектра Кадомцева–Петвиашвили $E(k) \sim k^{-2}$ для всех пространственных размерностей.
Для проверки данной теории было проведено прямое численное моделирование турбулентности волн на глубокой воде в предположении потенциальности двумерных течений в рамках конформных переменных с учетом низкочастотной накачки и высокочастотного затухания вязкого типа. Для широкого диапазона амплитуд накачки нами не обнаружен режим слабой турбулентности, предсказанный ранее в работе: A. I. Dyachenko, Y. V. Lvov, V. E. Zakharov, Physica D, 87(1-4), 233-261 (1995). Для типичных параметров турбулентности главными эффектами являются опрокидывание волн, формирования на их гребнях каспов, которые вносят основной вклад в спектры турбулентности с зависимостью от частоты и волнового числа с одной и той же степенью, равной -4, в полном соответствии с теорией [1]. В этом сильно нелинейном режиме плотность вероятности крутизны волн при больших отклонениях имеет степенные хвосты, ответственные за перемежаемость турбулентности.

Литература

1. Е. А. Кузнецов, Спектры турбулентности, порождаемые сингулярностями. Письма ЖЭТФ, 80, 92-98 (2004).
2. Е.А. Кочурин, Е.А. Кузнецов. Эффекты сильной турбулентности для волн на воде. Письма ЖЭТФ, 122, 214 – 219 (2025).

Пылевые структуры над нагретой поверхностью

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
elen_am@inbox.ru

Ключевые слова: *турбулентная энергия, спектр, пылевая структура, степенной профиль для концентрации пылевого аэрозоля*

При околопороговых для процесса сальтации скоростях ветра и значительном нагреве поверхности отмечается устойчивый степенной профиль с показателем -1/2, определяемый подъемом воздуха, прогреваемого пылевым аэрозолем [1]. При меньших скоростях ($u^*<0.2$ м/с) – показатель -1/3. В моменты вспышек концентрации пылевого аэрозоля до значений в 200-1000 мкг/м^3 в течение 6-12 с (~20 м) наклон профиля становится «круче» (-1.25 – -0.6). Корреляционный анализ изменений концентрации для таких событий на 5 уровнях (0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 м, измерения фотометрами «Феникс–М», частота 10 Гц, 2024-2025 г., Калмыкия) показывает их синхронность с малыми временными сдвигами (~ 1 с), что указывает на перенос ветром наклоненных к вертикали пылевых структур (углы от 9 до 45º). Если полагать, что вынос пылевого аэрозоля осуществляется тепловыми (вихревыми) струями, то в стационарном случае, показатель степени будет -1/3; при наличии адвекции – -4/3. Для турбулентного переноса с учетом скоростей осаждения степень близка к -1/4. Пылевые структуры с профилями, как при адвекции, вероятно, имеют вихревую природу.

Турбулентная энергия движений воздуха, участвующих в переносе пылевого аэрозоля, в условиях интенсивной конвекции при возникновении когерентных тепловых структур может уменьшаться. Этому способствуют значительные флуктуации значений концентраций взвешенного в воздухе пылевого аэрозоля. Анализ моментов вспышек показывает синхронное изменение концентрации пылевого аэрозоля и трех типов ковариаций: температура-скорость, скорость-концентрация и температура-концентрация. Спектры флуктуаций концентрации аэрозоля демонстрируют наклоны: -1 и -4/3, которые характерны для спектров флуктуаций температуры и скорости при значительных температурных градиентах. Функции распределения для флуктуаций концентрации подобны аналогичным распределениям для вертикальной скорости [2]. Структурные функции первого порядка имеют наклоны ~1/6, 1/3 и 2/3.

Исследования выполнены при поддержке РНФ, №25–17–00346.

Литература

1. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С., Лебедев В.А. Устойчивость вертикального распределения пылевого аэрозоля при слабых и умеренных ветрах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2023. — Т. 59. — № 5. — С. 623-634.

2. Malinovskaya E.A., Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Azizyan G.V. Convective-turbulent structures over a natural heated surface // Boundary-Layer Meteorology. — 2026. — V. 192. — № 1. P. 9.

Возможности самолётного лидарного зондирования для исследования атмосферной турбулентности: эффект усиления обратного рассеяния и проект DELICAT

Мамонтов А.Е.[1], Горбунов М.Е.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
alex1372049@gmail.com

Ключевые слова: *атмосферная турбулентность, самолётный лидар, усиление обратного рассеяния, оптическая турбулентность, DELICAT, турбулентность ясного неба, дистанционное зондирование*

Обнаружение атмосферной турбулентности необходимо для обеспечения безопасности авиационных полётов. Особую опасность представляет турбулентность ясного неба (ТЯН), которая может возникать при отсутствии облачности и слабо обнаруживается традиционными бортовыми метеорологическими радиолокаторами. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является применение самолётных лидарных систем, позволяющих зондировать атмосферу впереди по курсу движения воздушного судна с целью раннего предупреждения о турбулентных областях. Рассмотрены основные подходы к лидарной диагностике атмосферных неоднородностей, включая молекулярное и аэрозольное обратное рассеяние, поляризационные методы, доплеровские измерения и использование эффектов распространения лазерного излучения в турбулентной среде. Отдельно анализируется эффект усиления обратного рассеяния (УОР), возникающий вследствие двукратного прохождения излучения через случайные неоднородности показателя преломления.

Измеряемый коэффициент УОР определяется геометрией наблюдений и распределением структурной характеристики флуктуаций показателя преломления C_n^2 вдоль трассы. На основе интегральных уравнений Гурвича–Воробьёва обсуждается физический смысл весовой функции, связывающей измеряемый коэффициент УОР с пространственным распределением турбулентности.

Отдельный раздел посвящён проекту DELICAT, направленному на разработку бортового УФ-лидара для обнаружения турбулентности ясного неба.

На основе работ И.А. Разенкова рассматриваются технические особенности УОР-лидаров, методы обработки сигналов и результаты экспериментальных наблюдений атмосферной турбулентности. Отмечаются возможности применения таких систем для исследования пограничного слоя атмосферы, обнаружения турбулентных следов воздушных судов и изучения пространственно-временной структуры турбулентных неоднородностей.

Литература

1. Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашкаров П.К. Эффект усиления обратного рассеяния Сов. Физика., Успехи физ. наук 30(4), 1987 (Том 152, с. 707–709).
2. Разенков И.А. Сопоставление данных турбулентного лидара с метеорологическими измерениями. Atmospheric and Oceanic Optics / «Оптика атмосферы и океана», 2022.

Модуляция скорости диссипации турбулентной кинетической энергии в приповерхностном слое моря в условиях Ленгмюровской турбулентности: результаты комплексных натурных измерений

Павлов М.И.
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
mixail.pavlov.1993@mail.ru

Ключевые слова: *вертикальный турбулентный обмен, волновой слой моря, скорость диссипации, экспериментальные исследования, циркуляции Ленгмюра, стационарная океанографическая платформа*

В 2021–2024 гг. на стационарной океанографической платформе в п. Кацивели экспериментально исследовалось влияние циркуляций Ленгмюра (ЦЛ) на вертикальный турбулентный обмен в приповерхностном слое моря. Выполнены комплексные измерения гидрофизических величин и их пульсаций с применением широкого набора измерительных средств, включая ADCP (DVS-6000, Workhorse Monitor 1200), турбулиметр «Сигма-1» и метеокомплекс МПВ 702.1007. По данным ADCP на глубине 3–4 м получена вертикальная компонента скорости течения W в зонах конвергенции, по которой установлены две зависимости параметров ЦЛ от скорости ветра на высоте 10 м (V_{10}).

Для разделения режимов применен метод кластеризации Gaussian Mixture Model с выбором числа кластеров по байесовскому информационному критерию. Определено два режима: ветро-доминирующий и волновой. Для них получены следующие регрессионные зависимости: $W_1 = 0{,}57V_{10} + 1{,}15$ ($R^2 = 0{,}52$) и $W_2 = 0{,}29V_{10} + 7{,}3$ ($R^2 = 0{,}51$). По возрасту волн (β) и турбулентному числу Ленгмюра (La_t) в каждом режиме было определено, что в ветро-доминирующем режиме превалируют в основном «зрелые» волны, так как $La_t \sim 1 \div 1{,}5$, $\beta \geq 1{,}2$, а в волновом режиме доминируют «молодые» волны, где $La_t \sim 0{,}6 \div 1$, $\beta < 1{,}2$.

По профилям скорости диссипации турбулентной энергии (ε), рассчитанным по спектрам пульсаций скорости, было установлено:

1) В ветро-доминирующем режиме ε изменяется в диапазоне $\sim 6{,}62 \cdot 10^{-6} \div 5{,}8 \cdot 10^{-7}$ м^2/с^3 на горизонтах 1 – 10 м;

2) В волновом режиме ε изменяется в диапазоне $\sim 2{,}39 \cdot 10^{-5} \div 2{,}88 \cdot 10^{-6}$ м^2/с^3 на горизонтах 1 – 10 м;

Таким образом, экспериментально подтверждается наличие двух режимов ЦЛ, которые можно разделить по β и Lat, причем значения ε в волновом режиме в ~ 2.5 раза больше, чем в ветро-доминирующем, что указывает на качественно различное турбулентное перемешивание. Предложенные параметризации $W(V_{10})$ и количественные оценки ε могут быть использованы для совершенствования моделей турбулентности верхнего слоя моря.

Об относительной плотности спиральности в приземном слое

Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А., Курганский М.В., Копров В.М., Безверхний В.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
Solenaya@ifaran.ru

Ключевые слова: *относительная спиральность, турбулентность, когерентные структуры, атмосферный приземный слой, вихри*

На основе измерений турбулентности в летний период на Цимлянской научной станции ИФА РАН (2012, 2023 гг.) и на опустыненной территории в Калмыкии (2023 г.) рассмотрены свойства относительной спиральности – спиральности, нормированной на произведение амплитуд скорости и завихренности. Выделены различные типы наблюдаемых распределений относительной спиральности, часть из которых наблюдалась ранее в численном моделировании. Показана корреляция спиральности и энстрофии. Для спектров спиральности наблюдаются как классические наклоны -5/3 и -1 для низких частот, так и наклоны -4/3, связанные с конвекцией. На основе статистики эпизодов относительной спиральности одного знака получены оценки для размеров субмезомасштабных структур. Как размеры, так и средние значения относительной спиральности таких структур с высокой значимостью распределены по логнормальному закону. Средние масштабы для условий сильной конвекции (Калмыкия, 2023) составляют около 15 м. Для умеренно-ветровых условий (Цимлянск, 2012) – средние масштабы структур, проявляющих заметную зеркальную асимметрию, составляют 100-120 метров.

Моделирование турбулентных течений в длинных каналах

Сухановский А.Н.[1], Семин М.А.[2], Беляева А.В.[1], Попова Е.Н.[1], Файнбург Г.З.[2], Таций А.В.[2]
[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*
[2]*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия*
san@icmm.ru

Ключевые слова: *турбулентные струи, RANS, лабораторное моделирование*

Современное проектирование систем вентиляции подземных предприятий перестало быть сугубо инженерной задачей, касающейся только технических параметров оборудования. В условиях модернизации шахтных систем вентиляции критически важным становится учет структуры воздушных потоков в протяженных горных выработках. Так, для тупиковых выработок вынужденное течение, что существенно усложняет её математическое моделирование и обусловливает необходимость применения трёхмерных численных моделей турбулентности. Применение традиционных подходов на основе RANS-моделей турбулентности обеспечивает качественное согласие с натурными измерениями, однако не позволяет адекватно описать формирование застойных зон вблизи забоя [1]. Также надо отметить, что RANS-модели плохо описывают течения, в которых есть медленно осциллирующие когерентные вихревые структуры [2]. Альтернативным подходом к исследованию развития струйных течений в ограниченном пространстве является лабораторное моделирование, позволяющее детально исследовать характеристики струйного течения в контролируемых условиях. Основным препятствием для прямого моделирования течений в горных выработках является невозможность достижения необходимых значений управляющих параметров из-за ограниченных размеров установки. Вынужденное течение в выработке является турбулентным и определяется турбулентной вязкостью, значение которой намного превышает значение кинематической вязкости. Это дает определенную надежду, что при близких значениях эффективного числа Рейнольдса для горной выработки, рассчитанного через турбулентную вязкость и классического числа Рейнольдса в лабораторной модели, течения будут качественно подобны. В работе представлен сравнительный анализ результатов расчетов в рамках полномасштабных RANS и гибридных моделей, лабораторных экспериментов и натурных измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 26-19-00270.

Литература

1. Semin et al. Insights into turbulent airflow structures in blind headings under different ventilation duct distances // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. P. 23768.
2.Hanjalić K., Launder B. Modelling turbulence in engineering and the environment: second-moment routes to closure. Cambridge university press, 2011.

Термическая конвекция в атмосферном пограничном слое над степной поверхностью: вихреразрешающее моделирование и сопоставление с натурными измерениями в Цимлянске

Чечин Д.Г.[1,2], Янышев Д.С.[1,3], Ежов А.Д.[1,3], Зайцева Д.В.[1], Шишов Е.А.[1], Артамонов А.Ю.[1], Мортиков Е.В.[2], Дебольский А.В.[1,2], Малиновская Е.А.[1], Чхетиани О.Г.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*
chechin@ifaran.ru

Ключевые слова: *атмосферный пограничный слой, термики, турбулентность, вихреразрешающее моделирование*

Представлены результаты вихреразрешающего моделирования (LES) суточной эволюции пограничного слоя атмосферы над однородной степной поверхностью и их сопоставление с данными эксперимента, проведённого в августе 2022 г. на стационаре ИФА РАН в Цимлянске. Измерения включали турбулентные пульсации на трёх уровнях мачты (2, 10 и 30 м), содарное зондирование, профили температуры до 1 км, температуру поверхности и компоненты радиационного баланса.

Для моделирования выбраны ясные безоблачные дни. На нижней границе задавался наблюдавшийся суточный ход температуры поверхности, начальные условия построены по данным профилирования и реанализа. Верификация по средним профилям температуры и ветра, потокам тепла и импульса и дисперсиям скорости и температуры по данным мачты и содара показала, что модель хорошо воспроизводит суточный ход средних и турбулентных характеристик. Интегральные масштабы турбулентности сопоставлены с наблюдениями и эмпирическими зависимостями.

Основное внимание уделено когерентным структурам, прежде всего термикам. Термики выделяются и отслеживаются в модели с помощью пассивной примеси с конечным временем жизни. Рассчитана статистика их размеров, времени жизни и вклада в перенос тепла в течение дня. Предложен подход, связывающий трёхмерные структуры в модели с событиями в точечных измерениях: к наблюдаемым и модельным рядам применяется единый алгоритм детектирования. Это позволяет оценить, какая доля приземных структур является основаниями термиков масштаба пограничного слоя, и выявить их наблюдаемые признаки. Для утреннего перехода выполнен расчёт с уменьшенным шагом сетки, позволяющий проследить формирование термиков из приземных структур. В докладе представлены первые результаты анализа.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-17-00346.

Вклад штормовых волн и ленгмюровских циркуляций в вертикальный турбулентный обмен

Чухарев А.М., Павлов М.И., Коржуев В.А., Павленко О.И.
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
alexchukh@mail.ru

Ключевые слова: *турбулентный обмен, скорость диссипации, морская поверхность, параметризация обрушений волн, эмпирические зависимости, верификация модели*

Широко распространенные процессы образования обрушивающихся волн и циркуляций Ленгмюра (ЦЛ) остаются недостаточно изученными и в современных моделях морской турбулентности рассматриваются весьма упрощенно. Недостаточное количество экспериментальных исследований в штормовых условиях и неразвитая теория пока не позволяют установить надежную параметризацию обрушивающихся волн и циркуляций Ленгмюра для оценки их вклада в турбулизацию верхнего слоя моря.

В отделе турбулентности МГИ РАН разрабатывается многомасштабная модель турбулентности для приповерхностного слоя, в которой учитываются основные механизмы генерации турбулентности, включая обрушение волн и ленгмюровскую циркуляцию.

Для учета ЦЛ в интенсификации турбулентности слоя турбулентный перенос волновой кинетической энергии оценивается по вертикальной компоненте пульсаций скорости, скорректированной эмпирической зависимостью от турбулентного числа Ленгмюра. В модель также введен член, описывающий генерацию турбулентности вихревой силой Лейбовича.

Параметризация обрушений поверхностных волн в модели осуществляется с учетом доли поверхности моря, занятой обрушениями. Верификация различных эмпирических зависимостей проводилась по экспериментальным данным о скорости диссипации турбулентной энергии, полученным в прибрежной зоне Черного моря на стационарной океанографической платформе. Все три рассмотренные зависимости дают в модельных расчетах схожие результаты, но умеренное преимущество имеет параметризация, полученная сотрудниками МГИ. Ее использование улучшало соответствие с натурными измерениями.

Сравнение большого массива экспериментальных данных с модельными показало, что проведенные усовершенствования многомасштабной модели дают возможность более точного расчета характеристик турбулентного обмена в верхнем пограничном слое моря в различных гидрометеорологических условиях.

Исследования выполнены в рамках госзадания FNNN-2024-0001 «Океанологические процессы».

Использование БПЛА коптерного типа для мониторинга атмосферной турбулентности в городском каньоне

Шелехов А.П., Тельминов А.Е., Капустин С.Н., Капустина А.С., Поплевина О.Н.
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
ash1404@mail.ru

Ключевые слова: *турбулентная атмосфера, городской каньон, квадрокоптер, погрешность измерений, скорость и направление ветра*

В настоящей работе представлены результаты калибровки БПЛА коптерного типа Phantom 4 Pro и данные исследования атмосферного пограничного слоя в городском каньоне. Исследования осуществлялись на территории Географической обсерватории ИМКЭС СО РАН, на которой установлены несколько метеорологических комплексов, на которых установлены несколько анемометров АМК-04 на разных высотах. Парение квадрокоптера осуществлялось на высотах 40 и 60 м в зависимости от решаемых задач.

Хорошо известно, что информация о скорости и направлении ветра может быть получена из журнала полетов квадрокоптера. Однако в данной работе характеристики воздушного потока были оценены с использованием теоретического подхода, разработанного в [1]. В работе изучена погрешность измерений скорости и направления ветра усредненных за время парения в атмосфере квадрокоптера Phantom 4 Pro в течении 10 и более минут. Результаты регрессионного анализа показывают, что полученные данные о скорости и направлении ветра, собранные квадрокоптером, не содержат статистически значимых систематических погрешностей. Значения коэффициентов детерминации превышают порог, принятый для физических экспериментов, что подтверждает высокую степень надежности измерений турбулентных потоков в атмосфере с использованием квадрокоптера.

В работе также представлены результаты исследования профилей скорости и направления ветра в свободной атмосфере и внутри каньона, где наблюдаются логарифмический и экспоненциальный законы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00746, https://rscf.ru/project/25-27-00746/.

Литература

1. Shelekhov, A. High-Resolution Profiling of Atmospheric Turbulence Using UAV Autopilot Data / A. Shelekhov, A. Afanasiev, E. Shelekhova, A. Kobzev, A. Tel'minov, A. Molchunov, O. Poplevina // Drones. — 2023. — Vol. 7. — P. 412. — DOI 10.3390/drones7070412.

Применение квазигазодинамического алгоритма для расчета конвективного теплообмена в атмосферном пограничном слое

Широков И.А.[1], Елизарова Т.Г.[2], Янышев Д.С.[3,4]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*
[3]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*
[4]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
ivanshirokov@inbox.ru

Ключевые слова: *атмосферный пограничный слой, конвекция, квазигазодинамический алгоритм*

Конвекция в приземном слое атмосферы определяет обмен теплом, влагой и примесями между поверхностью и атмосферой; от точности ее воспроизведения зависят прогностические модели, оценки ветровых и тепловых нагрузок, расчеты рассеяния выбросов. Для описания таких течений применяются DNS, RANS и метод крупных вихрей (LES) [1, 2]. Альтернативой может служить квазигазодинамический (КГД) алгоритм, основанный на регуляризованных уравнениях Навье–Стокса, в котором подсеточная диссипация обеспечивается особым осреднением неразрешаемых на сетке деталей течения [3]. Было показано, что КГД алгоритм позволяет проводить моделирование турбулентной конвекции в свободном течении (в частности, на примере задачи распада вихря Тейлора–Грина).

В данной работе на основе КГД алгоритма моделируется свободная конвекция в области 4×4 км высотой 2.4 км при потоке тепла от поверхности 0.06 К·м/с, физическое время 2 ч. Референсными служат данные LES [1] и данные вихреразрешающего моделирования, проведенного в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН [2] на основе фильтрованных уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска с подсеточной вязкостью, параметры которой находятся динамической процедурой (эти расчеты также сделаны в рамках настоящей работы).

Расчеты на основе КГД алгоритма разрешают трехмерную вихревую структуру течения и формирование термиков. Профили вертикального потока тепла (ковариации вертикальной скорости и потенциальной температуры) хорошо согласуются с референсными данными.

Литература

1. Schmidt H., Schumann U. Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations // J. Fluid Mech. – 1989. – Vol. 200. – P. 511–562.
2. Ткаченко Е. В. [и др.] Вихреразрешающее моделирование и исследование параметризаций затухающей турбулентности в вечернем переходе атмосферного пограничного слоя // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 58. – № 3. С. 263–281.
3. Elizarova T. G. Quasi-Gas Dynamic Equations. – Dordrecht: Springer, 2009. – 286 p.

Обобщение результатов пульсационных измерений атмосферной турбулентности

Шишов Е.А.[1], Воловодов А.А.[2], Зайцева Д.В.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
shishov.yegor@gmail.com

Ключевые слова: *турбулентность, приземный слой, пульсационные измерения*

В работе представлены результаты полевых измерений, проводившихся в 2012-2015 гг. в Ростовской области на Цимлянской научной станции ИФА им. А.М. Обухова. В летний период (июль-август) при помощи ультразвуковых термометров-анемометров производства Gill и METEK проводились непрерывные измерения длительностью от 7 до 14 суток. Приборы устанавливались на мачтах высотой до 30 метров и регистрировали флуктуации компонент скорости ветра, а также акустической температуры с частотой 20 Гц. Порядка 2.5 тысяч часов наблюдений, подвергнутые предварительной обработке, были использованы для расчёта дисперсий компонент скорости ветра, вертикальных потоков тепла и импульса, а также масштаба Обухова. Были построены спектры пульсаций температуры и модуля скорости ветра, содержащие характерные степенные участки. Полученная в результате обработки натурных измерений база данных может быть использована для проверки и верификации различных численных моделей атмосферной турбулентности. Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 25-17-00346.

Парадигма теории турбулентности

Юшков В.П.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
vpyushkov@gmail.com

Ключевые слова: *теория турбулентности*

В докладе обсуждаются проблемы классической теории турбулентности и предлагается выход из сложившегося тупика в развитии этой теории. Приближения теории турбулентности: локальной стационарности, изотропности и однородности, приближение несжимаемости и приближение Буссинеска, вмороженности турбулентных вихрей и их переноса средним потоком (гипотеза Тейлора), многочисленные «модели турбулентности», эмпирические коэффициенты и функции, могут быть интегрированы в предлагаемом подходе как «нулевое» приближение. В этой парадигме теория турбулентности служит инструментом анализа неопределённости и ошибок «классических» приближений. Можно сказать, что теория турбулентности начинается там, где уравнений гидродинамики становится недостаточно, там, где требуется другой математический аппарат. Как подтверждение заявляемого тезиса, в докладе, на основании измерений в пограничном слое атмосферы и в турбулентности за решёткой, демонстрируется связь флуктуаций плотности в турбулентном потоке с флуктуациями скорости, связь локального внешнего масштаба турбулентных вихрей и масштаба однородности поля адиабатических флуктуаций, рассчитывается время адаптации к приближению Буссинеска и определяется время стационарности как необходимое время расчёта статистических характеристик.

Масштаб приспособления к приближению Буссинеска в турбулентности за решёткой

Юшков В.П., Курбатов Г.А.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
vpyushkov@gmail.com

Ключевые слова: *турбулентность за решёткой, приближение Буссинеска, адаптация поля давления*

Проведённые в аэродинамической трубе Т-6 Института механики МГУ измерения показали, что за решёткой формируются пульсации скорости звука, достаточной интенсивности для измерений флуктуационным ультразвуковым акустическим анемометром. Дисперсия этих турбулентных флуктуаций уменьшается на порядок с увеличением расстояния от решётки вдоль открытой рабочей области трубы. Флуктуации температуры в турбулентной среде рассматриваются в работе не как скалярная пассивная примесь, но как мера пространственной корреляции поля скоростей и неопределённости в измерениях статистических характеристик. Модели классической теории турбулентности связываются с недостаточностью уравнений гидродинамики для описания вероятностной структуры турбулентных течений. Пространственный масштаб неоднородности кинетической энергии в турбулентности за решёткой связывается с временным масштабом корреляции адиабатических флуктуаций и с изменением средней компоненты поля давления вдоль трубы. Предложена форма спектра изотропных адиабатических флуктуаций давления в рабочей области этой трубы, которая позволяет связать пространственный масштаб статистического ансамбля турбулентных вихрей с временем корреляции адиабатических флуктуаций. Проведённые измерения показывают связь времени релаксации автокорреляционной функции флуктуаций скорости звука с дисперсией этих флуктуаций и средней скоростью натекающего потока.

Рекуррентная нейросетевая модель управления парящим полётом БПЛА в конвективном пограничном слое атмосферы по данным вихреразрешающего моделирования

Янышев Д.С.[1,2], Ежов А.Д.[1,2], Гритчин Д.М.[1]
[1]*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
dyanishev@gmail.com

Ключевые слова: *моделирование крупных вихрей, управляемый полет, рекуррентная нейросеть*

Рассматривается автономное парение безмоторного БПЛА в конвективном пограничном слое атмосферы при использовании только причинной (бортовой) информации о ветре.
Поля скорости получены вихреразрешающим моделированием с помощью совместного DNS/LES/RANS-кода НИВЦ МГУ и ИВМ РАН [1, 2]: уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска, консервативные конечно-разностные схемы 2-го порядка на разнесённой сетке, метод проекции, схема Адамса–Башфорта 3-го порядка, уравнение Пуассона — BiCGstab с многосеточным предобусловливателем; подсеточное замыкание — модель Смагоринского с динамической процедурой и лагранжевым осреднением. Использованы четыре серии полей, различающиеся разрешением (dx = 21–33 м), поверхностным потоком тепла и наличием геострофического ветра.
Динамика аппарата описана точечной моделью планера (m = 2 кг, A = 0.5 м², Cx = 0.05, Cz = 0.5) с единственным управлением — углом крена φ, $|\varphi| \le 30°$; интегрирование РК4, ветер интерполируется трилинейно. Балансировочная скорость снижения при φ = 0 равна 1.12 м/с.
Управление реализовано рекуррентной нейросетью (LSTM 64 + MLP 64×64), обученной алгоритмом RecurrentPPO. Вектор наблюдений (16–20 компонент) содержит только причинные признаки: состояние аппарата, ветер в его точке, отношение дисперсий вертикального ветра (EWMA), градиент подъёмной силы вдоль траектории и разность вертикальной скорости ветра на законцовках крыла Δw. Награда — прирост максимальной достигнутой высоты.
Анализ чувствительности выявил доминирование Δw (22–24 % вклада), что соответствует приёму центрирования в термике по разности подъёмной силы на консолях.
На траекториях 500 с модель значимо превосходит пассивное планирование (φ = 0) на всех сериях, включая контрольную: доля траекторий с конечным набором высоты 36 % против 3 %, столкновений с землёй — 36 против 116 из 500. Существенное улучшение даёт периодический сброс скрытого состояния LSTM, удерживающий наблюдения в области обучающих значений.
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-17-00346.

Литература

1. Ткаченко Е.В., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Глазунов А.В. // Изв. РАН. ФАО. 2022. Т. 58. № 3. С. 263–281.
2. Tkachenko E.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V. // Lobachevskii J. Math. 2021. V. 42. № 7. P. 1580–1595.

Энергетическая эффективность и структурная устойчивость композитных вихревых моделей Большого Красного пятна Юпитера

Аракелян Е.М.[1,2]
[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*
arakelyan.em@phystech.edu

Ключевые слова: *композитный вихрь, стационарный вихрь, нестационарный вихрь, потенциальная завихренность, полная механическая энергия, структурная устойчивость, Большое красное пятно Юпитера, атмосферы планет-гигантов, эллиптическая траектория, нутационные колебания*

В работе решены задачи о стационарном и нестационарном композитном вихре. Аналитически доказано, что условие стационарности системы на f-плоскости выполнимо исключительно при строго противоположном знаке потенциальной завихренности внутреннего ядра по отношению к внешнему. Это объясняет наблюдаемое циклоническое вращение в центре антициклона. Однако расчет полной механической энергии показал, что стационарный композитный вихрь всегда энергетически избыточен по сравнению с эквивалентным однородным вихрем, а его энергия неограниченно возрастает при стремлении размера внутреннего ядра к размеру внешнего. Это ставит под сомнение физическую реализуемость строго стационарной двухкомпонентной модели.

В качестве альтернативы предложена модель нестационарного композитного вихря, в которой внутренний вихрь эволюционирует под действием поля основного вихря и фонового сдвига. Показано, что при слабом влиянии на границу основного вихря внутренний вихрь не подвержен деструктивному режиму неограниченного вытягивания в филамент: его центр движется по замкнутой эллиптической траектории (с периодом порядка 6 земных суток), а форма испытывает ограниченные вращения или нутационные колебания. Ключевым результатом является доказательство того, что композитный вихрь с нестационарным циклическим вложением может обладать меньшей суммарной механической энергией, чем однородный вихрь. Это указывает на энергетическое предпочтение нестационарной модели и объясняет физическую причину долгоживучести БКПЮ.

В работе впервые введено понятие структурной устойчивости применительно к композитным вихрям. Доказано, что двухкомпонентная структура устойчива к возмущению ее третьим вложенным вихрем, если его размеры близки к размеру внутреннего ядра. Полученные аналитические результаты качественно и количественно согласуются с данными натурных наблюдений и предлагают новый взгляд на механизмы стабилизации долгоживущих вихревых структур в атмосферах планет-гигантов.

Сравнительный анализ изменчивости уровня океана для разных версий климатической модели океана ИВМ РАН

Благодатских Д.В., Ежкова А.А., Оноприенко В.А., Яковлев Н.Г.
Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
blago1958@mail.ru

Ключевые слова: *климатическое моделирование, протокол CORE-II, межгодовая изменчивость*

В данном докладе представлен сравнительный анализ воспроизведения многолетнего среднего уровня и межгодовой изменчивости уровня океана в Арктическом регионе в разных версиях модели океана, составляющей часть модели Земной системы ИВМ РАН (ARTS-ESM).
Все расчеты проводились по протоколу CORE-II и модельные поля сравнивались с данными реанализа ORA-S5. В качестве основного результата получено, что новая версия модели океана, получившая название INMocean, дает более реалистичное воспроизведение изменчивости уровня океана в Арктике, чем предыдущие версии модели океана.

Динамика экваториальных тепловых пятен

Гончаров В.П.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
v.goncharov@rambler.ru

Ключевые слова: *rotating fluids, shallow water dynamics, thermal spots*

For a model of a thin spherical layer of an incompressible rotating fluid subjected to the action of Coriolis and buoyancy forces, both analytical solutions in the form of stationary thermal spots moving along the equator and self-similar solutions are found. The influence of the parameters determining the shape of the spots on their propagation speed and direction is studied. It is found that the speed and direction of motion of the spots depend not only on the sign of their thermal contrast with the background flow, but also on the ratio of the semi-axes determining their shape. In particular, if the ratio of the equatorial semi-axis to the meridional one b/a is equal to $\pi/2$, the spots are at rest. If the spots are elongated along the equatorial axis to such an extent that $b/a>\pi/2$, then “cold” spots move westward and “hot” spots move eastward. Under the condition $0.747\le b/a<\pi/2$, the situation is reversed: “hot” spots move westward and “cold” spots move eastward. Self-similar solutions in the model are realized strictly in the form of circular thermal spots, and their radius varies according to a power law with a scaling exponent k, which is determined by the behavior of the cross-frontal buoyancy gradient on the spot contour. We note that the regime $k=1/4$ is realized under the assumption of a constant buoyancy gradient, while the regime $k=1/6$ corresponds to the conservation of total buoyancy.

Литература

1. G.,S. Deem and N.,J. Zabusky, Phys. Rev. Lett. **40**, 859 (1978).
2. V.,P. Goncharov, Phys. Rev. Fluids **35**, 066606 (2023).
3. V.,P. Goncharov, Dynam. Atmos. Oceans **111**, 101584 (2025).
4. O.,V. Rudenko, Izv. vyssh. uch. zav. Prikladnaya Nelineynaya Dinamika **26**:3, 7 (2018).
5. V.,P. Goncharov, Phys. Rev. Fluids **6**, 103801 (2021).
6. E.,A. Kuznetsov, JETP Lett. **80**, 83 (2004).

Собственные моды захваченных топографических волн Россби и число струй Антарктического циркумполярного течения над хребтом Шеклтона в проливе Дрейка

Егорова В.М.
Институт водных проблем РАН, Москва, Россия
Vikchik96@yandex.ru

Ключевые слова: *антарктическое циркумполярное течение, топографический захват, моды Россби, хребет Шеклтона, струи, собственные значения, радиус деформации Россби, пролив Дрейка, уравнение потенциальной завихренности*

Формирование струй АЦТ в проливе Дрейка - классическая задача геофизической гидродинамики. Ранее трёхслойная квазигеофизическая модель на f-плоскости показала, что дипольная вихревая структура над подводной горой и серией впадин формирует три классические струи [1]. В настоящей работе результаты дополнены аналитическими выкладками на β-плоскости.

Хребет Шеклтона аппроксимируется параболическим поперечным профилем глубины. В качестве исходного уравнения взят закон сохранения потенциальной завихренности в квазигеофизическом приближении на β-плоскости. Решение ищется в виде волны, бегущей вдоль хребта. При параболическом профиле уравнение сводится к уравнению Эйри; граничные условия – непрерывность функции и её производной на границах хребта, сшивающие внутреннее решение с экспоненциально затухающим снаружи.

Собственные функции образуют дискретный набор мод: функция с номером n имеет n узлов и n+1 пучностей. Пучности соответствуют струям АЦТ, откуда универсальное правило: $N = n_{max} + 1$. Мода n = 2 даёт три классические струи, мода n = 10 – одиннадцать [2]. ВКБ-квантование даёт масштаб топографических мод – единицы–десятки километров. Узкие моды неустойчивы по Рэлею–Куо: генерируемые вихри перемешивают поток, и струя «расширяется» до масштаба, где течение устойчиво. Наблюдаемая ширина струй (~44 км, [3]) согласуется с этим равновесием.

Топография и бароклинность играют разные роли. Топография определяет число и относительное расположение струй, бароклинная динамика – их абсолютную ширину (что согласуется с радиусом деформации Россби ≈ 56 км).

Число струй определяется числом связанных мод, удерживаемых эффективной потенциальной ямой, глубина которой контролируется скоростью потока U: с ростом U яма уменьшается, число мод падает. Энергия системы определяет, какие из разрешённых мод возбуждены, но не может увеличить их число сверх n + 1. Это объясняет наблюдаемое «плавание» числа струй – от 3 до 11 [2] – как разные режимы одной системы.

Литература

1. Orsi A.H., Whitworth T., Nowlin W.D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Res. Pt. I. 1995. Vol. 42. P. 641–673.
2. Тараканов Р.Ю., Гриценко А.М. Струйная структура Антарктического циркумполярного течения в проливе Дрейка // Океанология. 2018. Т. 58(4). С. 541–550.
3. Gille S.T. Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: Method and application // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99(C9). P. 18255–18273.

Свойства турбулентных течений при различных условиях их формирования

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

Ключевые слова: *турбулентность, прямое численное моделирование*

Численно исследованы когерентные структуры и пульсации скорости турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости во вращающемся сферическом слое вблизи предела формирования турбулентности. Рассматриваются два способа формирования течений: последовательное и одновременное увеличение скорости встречного вращения сферических границ до предварительно выбранных значений чисел Рейнольдса. При обоих способах формирования в турбулентных течениях присутствуют крупномасштабные когерентные структуры, которые можно определять по распределению контуров азимутальной скорости течения. Показано, что при одних и тех же числах Рейнольдса повышение уровня когерентности этих структур, понимаемого как возможность выделения доминирующего волнового числа в азимутальном направлении, снижает интенсивность пульсаций азимутальной компоненты кинетической энергии течения. Сравнение амплитуд пульсаций скорости в одних и тех же точках течения при одинаковых числах Рейнольдса, но разных способах формирования турбулентности позволило сделать следующие выводы. Спектры с наклоном -3 в инерционном интервале, соответствующие двумерной турбулентности с передачей энергии от меньших масштабов к большим, формируются в тех локальных областях течения, в которых амплитуда пульсаций скорости максимально снижается. И, наоборот, в локальных областях с максимальным возрастанием амплитуды флуктуаций скорости, наблюдаются спектры с наклоном -5/3 в инерционном интервале, соответствующие трехмерной турбулентности.

Оценка агеострофической компоненты течений для морских мезомасштабных движений при умеренных числах Россби по данным спутниковой альтиметрии на примере Черного моря

Жмур В.В.[1,2,3,4], Красильников Д.С.[1,2,3], Жук В.Р.[4]
[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*
[4]*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
zhmur-vladimir@mail.ru

Ключевые слова: *Черное море, морские течения, Основное Черноморское течение, спутниковая альтиметрия, агеострофическая скорость, геострофическое приближение, число Россби, мезомасштабная динамика, вертикальный обмен, динамика океана*

Спутниковая альтиметрия описывает преимущественно геострофическую циркуляцию, однако агеострофическая компонента, обусловленная ускорениями и нелинейностью, существенно влияет на вертикальный обмен и лагранжев перенос (1,2). Существующие методы ее оценки требуют численного моделирования или измерений in situ. Цель работы – разработка метода определения агеострофической компоненты течений исключительно по данным спутниковой альтиметрии и его апробация для Черного моря.

Предложен аналитический метод расчета 2D агеострофической скорости через пространственно-временные производные геострофического поля. Подход основан на уравнениях геофизической гидродинамики и применим при умеренных числах Россби ($0{,}1<Ro<0{,}3$) вне слоя Экмана. Метод апробирован на ежедневных полях спутниковой альтиметрии CMEMS (3) за 2024 г. и вдольтрековых данных миссии SWOT для октября–ноября 2024 г. (4).

Установлено, что статистически значимая агеострофическая компонента (отношение сигнал/шум > 1) локализована в зонах меандрирования Основного Черноморского течения (ОЧТ) и на периферии мезомасштабных вихрей. Пик активности приходится на осень в период интенсификации ОЧТ. Анализ членов уравнений показал, что основной вклад в формирование агеострофической скорости вносит нелинейная адвекция, а локальное ускорение в среднем на порядок меньше. Сопоставление с высокоразрешающими данными SWOT подтвердило, что в динамически активных районах агеострофическая скорость достигает 10–25% от геострофической. Метод эффективен именно при умеренных числах Россби.

Разработанный диагностический алгоритм позволяет восстанавливать агеострофическую добавку к геострофическим течениям без привлечения численных моделей или натурных измерений. Учет этой компоненты, достигающей четверти от общей скорости в зонах фронтов и вихрей, критически важен для корректной диагностики динамики верхнего слоя океана и расчета траекторий переноса примесей.

Литература

1. Klein P., Lapeyre G. // Annual Review of Marine Science. 2009. Vol. 1. P. 351–375.
2. Cao Y. et al. // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2023. Vol. 128, iss. 1. e2022JC019357.
3. CMEMS. European Seas Gridded L4 Sea Surface Heights And Derived Variables Reprocessed 1993-Ongoing [Dataset] // Copernicus Marine Service, 2023.
4. Tchonang B. C. et al. nt // Earth and Space Science. 2026. Vol. 13, iss.2. e2025EA004424.

О переносе массивных частиц атмосферными течениями

Ингель Л.Х.[1,2]
[1]*НПО "Тайфун", Обнинск, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
lev.ingel@gmail.com

Ключевые слова: *массивные частицы, перенос в атмосфере, гидрометеоры, выпадение, атмосферные течения, теория, нелинейная динамика*

Теоретически исследуется перенос инерционных частиц (прежде всего, достаточно массивных гидрометеоров) атмосферными течениями. Известно, что горизонтальный перенос интенсивных осадков сдвиговыми течениями весьма важен для динамики некоторых опасных конвективных явлений. Другое известное приложение связано с возможностью горизонтально-неоднородного выпадения осадков при горизонтальной неоднородности фоновых течений. В докладе рассматриваются частицы со скоростями оседания порядка 5-20 м/с и используется нелинейная модель с квадратичной зависимостью сопротивления от скорости. Коэффициент сопротивления в этой модели пропорционален модулю вектора скорости частицы относительно среды. Поэтому разные составляющие движения, вносящие вклад в модуль скорости, влияют друг на друга, что дополнительно осложняет расчет переноса оседающих частиц горизонтальным течением. Решение задачи о динамике движения и дальности горизонтального переноса частиц в большой степени определяется соотношением высоты источника (исходной точки) и пространственного масштаба, равного отношению квадрата скорости стационарного оседания частицы в покоящейся среде к ускорению силы тяжести. Для случая больших значений этого отношения предложен эффективный подход, позволяющий получать простые приближенные аналитические решения для дальности горизонтального переноса частиц. Приведены конкретные примеры расчетов для распространенных типов атмосферных течений. Рассмотренная модель позволяет получить простые приближенные закономерности переноса инерционных частиц.

Об эффекте обращения направления конвекции при турбулизации двухкомпонентной жидкости

Ингель Л.Х.[1,2]
[1]*НПО "Тайфун", Обнинск, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
lev.ingel@gmail.com

Ключевые слова: *конвекция, двухкомпонентная среда, дифференциальная диффузия, аналитическая модель, турбулентность*

Теоретически исследуется нестационарная конвекция в двухкомпонентной среде с существенно различающимися коэффициентами переноса (например, в соленой воде). В качестве конкретного примера рассматриваются течения, возникающие в нейтрально стратифицированной среде у наклонной стенки (над наклонной поверхностью), с которой в среду поступают постоянные (после включения) потоки тепла и примеси. Используется известное точное решение нестационарной задачи о конвекции у вертикальной стенки с граничными условиями второго рода, которое обобщается на случай течения над наклонной стенкой. Полная система уравнений гидротермодинамики и переноса примеси сводится к линейной системе за счет симметрии задачи, без каких-либо предположений о малости амплитуд возмущений. Линейность системы позволяет использовать принцип суперпозиции – независимо рассматривать и суммировать динамические эффекты двух компонент среды, от которых зависят отклонения ее плотности. Решение выражается через кратные интегралы вероятностей. Результаты, в частности, направление возникающих течений существенно зависят от соотношения значений коэффициентов обмена для разных субстанций. Возможны, например, нетривиальные ситуации, когда положительные притоки плавучести приводят, тем не менее, к возникновению нисходящих течений. Турбулизация течений, приводя к резким изменениям эффективных коэффициентов обмена, может, в частности, менять направление конвективных течений. Подробности расчетов содержатся в недавно вышедшей работе [1].

Литература

1. Ингель Л.Х. Об эффекте обращения направления конвекции при турбулизации двухкомпонентной жидкости // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2026. Т. 19, № 2. С. 19–25. https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-2.

«Сверхспиральность» распространенных типов атмосферных течений

Ингель Л.Х.[1,3], Макоско А.А.[1,2,3]
[1]*НПО "Тайфун", Обнинск, Россия*
[2]*Российская академия наук, Москва, Россия*
[3]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
lev.ingel@gmail.com

Ключевые слова: *атмосфера, спиральность, superhelicity, аналитические модели, опасные конвективные явления*

Фактор спиральности атмосферных течений в последние десятилетия привлекает все большее внимание. Анализ спиральности активно применяется для диагноза и прогноза атмосферных процессов. С конца 80-х годов определенное внимание в этом контексте уделяется также характеристике течений, получившей в англоязычной литературе название «superhelicity» [1] (в русскоязычной литературе общепринятая соответствующая терминология пока отсутствует; в настоящем докладе используем формальный перевод: «сверхспиральность»). Формальное определение superhelicity: скалярное произведение завихренности и ротора завихренности. Характеристики сверхспиральности в атмосферных процессах пока мало изучены. Представляется целесообразным, прежде всего, изучить ее характерный фоновый уровень в распространенных ситуациях и оценить возможные масштабы отклонений от фона при интенсивных конвективных явлениях. В настоящем докладе выполнены некоторые относящиеся сюда оценки и расчеты.

Согласно определению superhelicity, эта величина сильно зависит от произведений градиентов и вторых пространственных производных разных составляющих скорости. Поэтому она особенно велика по абсолютной величине для интенсивных конвективных явлений, таких как смерчи, для которых она, возможно, была бы полезным индикатором [2]. Согласно [3], эта величина может быть использована в качестве индикатора степени зрелости конвективного шторма. Такие явления существенно нелинейны и нестационарны, и их анализ, вообще говоря, обычно требует использования достаточно сложных численных моделей. Но фоновый, отсчетный уровень «сверхспиральности» может быть исследован и с помощью достаточно простых аналитических моделей, что и сделано в первых разделах настоящего доклада. Последний раздел демонстрирует существенные особенности уровня сверхспиральности в опасных конвективных явлениях. Эти оценки дают некоторые основания рассматривать уровень сверхспиральности как индикатор некоторых экстремальных погодных явлений.

Литература

1. Hide R. Superhelicity, helicity and potential vorticity // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 1989. V. 48, P. 69-79.
2. Büker M., Odell L.,Wurman J. et al. Localized vorticity enhancement through superhelical coherent structure in observed tornadic supercells // arXiv:1408.4366 [physics.ao-ph].
3. Fei Shiqiang, Tan Zhemin. On the helicity dynamics of severe convective storms // Adv. Atmos. Sci. 2001. V. 18. P. 67-86.

Регулярные и стохастические режимы пространственно-периодических течений

Калашник М.В., Чхетиани О.Г.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
ochkheti@gmail.com

Ключевые слова: *бароклинная неустойчивость, периодические течения, экмановское трение, нелинейные колебания хаотические режимы, метод Галеркина*

Центральное место в геофизической гидродинамике занимает исследование неустойчивости зональных течений. С развитием неустойчивости связывают образование атмосферных циклонов и антициклонов, синоптических вихрей в океане, упорядоченных вихревых дорожек над океанами и т.д. В настоящей работе исследуется устойчивость вертикальных периодических движений, инициируемых пространственно периодическими распределениями источников тепла. Такие источники служат грубой моделью конденсационных источников тепла в атмосфере, а сами движения моделируют упорядоченные гряды конвективных облаков (облачные улицы), наблюдаемые над океанами. Устойчивость системы вертикальных периодических движений стратифицированной жидкости исследовалась в [1]. Основное внимание при этом уделялось описанию линейной и нелинейной динамики возмущений в рамках системы уравнений метода Галеркина с пятью модами и в случае отсутствия диссипации. В отсутствии диссипации вертикальные движения неустойчивы при числе Ричардсона меньше 1/8. В настоящей работе мы исследуем задачу устойчивости в присутствии диссипации. Обнаружено, что потеря устойчивости в присутствии диссипации может приводить к формированию либо стационарного, либо осциллирующего во времени вторичного течения с нетривиальной топологией линий тока. Основной новый результат связан с обнаружением режима хаотического поведения во времени амплитуд гармоник при закритических значениях числа Ричардсона. Такое поведение для задачи конвекции было впервые обнаружено в знаменитой работе Лоренца [2]. Описанию хаотической динамики возмущений в геострофическом течении с вертикальным сдвигом скорости посвящены наши недавние работы [3,4]. Результаты подтверждают основной тезис Лоренца - для описания турбулентности или хаоса достаточно моделей с небольшим числом мод (без привлечения громоздких многомодовых моделей).

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, №23–17–00273.

Литература

1. Калашник М.В., Курганский М.В. Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2020. №4. С. 121-126.
2. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow Journal of Atmospheric Sciences. 1963. V. 20(3). P. 130–141.
3. Калашник М.В., Чхетиани О.Г. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. №5. С. 560-568.
4. Kalashnik M.V., Chkhetiani, O.G. Geophysical & Astrophysical Fluid dynamics. 2025. V. 119(1). P. 1-25.

Исследование транспортных и корреляционных свойств турбулентных течений на примере однородного и изотропного случая

Клиорин Н.И.[1,2,3], Кузанян К.М.[1,2], Рогачевский И.В.[3]
[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*
[3]*Bern Gurion University, Beer-Sheva, Israel*
k.kuzanyan@ya.ru

Ключевые слова: *развитая турбулентность, число Струхаля, теория ренорм-групп RNG*

В некоторых режимах турбулентных течений, например, в задаче астрофизического динамо среднего поля, величиной, определяющей свойства решений, является турбулентное число Струхаля. От него зависит возможность генерации крупномасштабного поля.
Используя RNG модель для однородной и изотропной турбулентности, мы изучим зависимость турбулентного числа Струхаля от числа Рейнольдса аналитическими методами и сформулируем методику проверки этой теории прямым численным моделированием.
Мы установили, при каких значениях числа Рейнольдса происходит качественное изменение зависимости числа Струхаля от числа Рейнольдса и предельные режимы при малых и больших числах Рейнольдса.
Работа поддержана грантом РНФ 21-72-20067.

Величина внутримассовой силы плавучести в окружающей среде конечных размеров

Кочин А.В.
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия
amarl@mail.ru

Ключевые слова: *сила плавучести, объемная и негидростатическая сила, эквивалентная плотность, приближение Буссинеска*

Вертикальные перемещения воздушных масс в атмосфере возникают вследствие действия силы плавучести. Ввиду отсутствия жестких границ внутри газа горизонтальный градиент давления в статическом состоянии в выделенном конечном объеме существовать не может. Вне зависимости от плотности газа распределение давления внутри объема повторяет распределение внешнего давления. Таким образом выталкивающая сила, как равнодействующая всех сил давления на внешнюю и внутреннюю поверхности объема, формально равна нулю. Внутримассовая выталкивающая сила может быть только объемной и негидростатической за счет разницы собственного вертикального градиента давления в объеме с иным градиентом во внешней среде (Кочин А. 2025). Для учета плавучести в уравнение Навье-Стокса добавляется эмпирическое соотношение в форме приближения Буссинеска, которое задает величину силы плавучести в предположении частного случая бесконечного объема окружающей среды. Формальный вывод и доказательство справедливости этого приближения не сделано. В работе рассматривается вывод соотношения для силы плавучести в объеме, который расположен в окружающей среде конечных размеров. В этом случае формируется собственный вертикальный градиент давления в соответствии с общей эквивалентной плотностью объема и внешней среды. Эквивалентная плотность определяется относительными величинами масс газа с разными температурами на рассматриваемом уровне. Отношение плотности в рассматриваемом объеме к эквивалентной плотности является корректирующим коэффициентом для силы плавучести. Например, при равных массах сила плавучести примерно вдвое меньше, чем в соответствии с приближением Буссинеска, а при пренебрежимо малой массе в объеме по сравнению с массой газа в окружающей среде она соответствует приближению Буссинеска. Использование приближения Буссинеска без коррекции может вызвать ошибку при моделировании горно-долинных циркуляций и внутренней структуры острова тепла.

Литература

1. Кочин А. В. Особенности внутримассовой плавучести. VIII конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии» 2025 г. Республика Адыгея, г. Майкоп. ISBN 978-5-6052373-0-3

Неустойчивость Тейлора-Куэтта в присутствии внешнего шума

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

Ключевые слова: *шум, неустойчивость Тэйлора-Куэтта*

Численно рассматривается неустойчивость течений вязкой несжимаемой жидкости во вращающемся сферическом слое, приводящая к образованию вторичного течения с парой вихрей Тейлора. Исследуется изменение положения критического значения числа Рейнольдса, соответствующего потере устойчивости течением, при воздействии двух видов шума с различающимися спектрами. Шум вносится в течение путем добавления к постоянной средней скорости вращения внутренней сферы случайных во времени флуктуаций с нулевым средним значением, внешняя сфера неподвижна. Как при добавлении шума, так и без него гистерезис по числу Рейнольдса не обнаружен. Расчеты проводились и в трехмерной, и в двумерной (с условиями симметрии относительно оси вращения и экватора) постановках. Показано, что внесение шума приводит к увеличению азимутальной скорости течения вблизи плоскости экватора и внешней сферы и к уменьшению - в меридиональном направлении от плоскости экватора к оси вращения. Чем больше наклон спектра шума, тем больше увеличение азимутальной скорости вблизи плоскости экватора. Установлено, что увеличение амплитуды шума приводит к снижению критического значения числа Рейнольдса, соответствующего пределу устойчивости. При одних и тех же амплитудах шума критическое значение числа Рейнольдса ниже для шума с наклоном спектра -2 по сравнению с шумом с наклоном спектра -1.

Закономерности генерации средних течений под воздействием внешнего шума

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

Ключевые слова: *шум, генерация средних течений*

Численно исследованы осесимметричные течения вязкой несжимаемой жидкости в сферических слоях при вращении границ с равными угловыми скоростями. Шум в виде случайных во времени флуктуаций скорости вращения с нулевым средним значением добавлялся к постоянной во времени средней скорости вращения внутренней сферы. Рассматривались два вида шума с наклонами спектра -0.1 и -1. Обнаружены степенные зависимости между осредненными во времени компонентами кинетической энергии течений и амплитудой шума. Установлено, что вид зависимостей сохраняется при изменении наклона спектра шума, относительной толщины сферического слоя и чисел Рейнольдса. Относительное увеличение средних значений меридиональной компоненты шума на несколько порядков больше относительного увеличения средних значений азимутальной компоненты. Противоположное соотношение наблюдается для среднеквадратичных отклонений: среднеквадратичные отклонения меридиональной компоненты на несколько порядков меньше аналогичной величины для азимутальной компоненты. Установлено, что при одних и тех же амплитудах шума, но большем наклоне спектра шума, увеличиваются осредненные во времени относительные величины, как кинетической энергии, так и ее флуктуаций.

Лабораторные и численные исследования внутренних гравитационных и инерционных волн в конвекции и их связь с 5-минутными колебаниями на Солнце

Кузанян К.М.[1,2], Клиорин Н.И.[1,2,3], Рогачевский И.В.[3]
[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*
[3]*Bern Gurion University, Beer-Sheva, Israel*
kuzanyan@gmail.com

Ключевые слова: *структуры в конвекции, инверсная стратификация температуры, частота Брунт-Вяйсяля Brunt-Vaisala, колебания в атмосфере Солнца*

Изучение свойств установившейся турбулентной конвекции в численных и лабораторных экспериментах показало, что при умеренных числах Рэлея (Рейнольдса) наряду с истинно турбулентными течениями сосуществуют колебательные режимы, связанные с наличием локальных участков инверсного температурного поведения, соответствующих стабильно стратифицированным слоям в конвективной среде.

Мы проводим сопоставление результатов численного моделирования с лабораторными экспериментами и делаем оценки таких колебательных явлений для поверхности конвективной зоны (фотосферы) Солнца.

Полученные решения в виде внутренних гравитационных волн мы связываем с наличием 3-5 минутных колебаний в атмосфере Солнца.

В условиях лабораторного эксперимента наряду с внутренними гравитационными волнами могут играть роль и инерционные волны, порождаемые крупномасштабной завихренностью.

Работа поддержана грантом РНФ 21-72-20067.

Теоретическая модель бароклинного конического вихря (с приложениями к атмосферным пыльным вихрям)

Курганский М.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
kurgansk@ifaran.ru

Ключевые слова: *вихревая вязкость, конические вихри, атмосферные пыльные вихри, турбулентное число Прандтля, радиационное выхолаживание по Ньютону*

С учетом диффузии углового момента (положительной или отрицательной), дополняющей традиционную турбулентную вязкость в уравнении для углового момента, разработана теория тонких вертикальных бароклинных конических вихрей, находящихся в состоянии приближенного циклострофического равновесия [1]. В этой теории меридиональная циркуляция в вихре имеет такую структуру, что точно выполняется уравнение термического ветра. Учет диффузии углового момента допускает существование вихревых решений, в которых движение воздуха вблизи оси вихря отличается от твердотельного вращения, и азимутальная скорость возрастает по степенному закону. Получены решения с радиальным профилем азимутальной скорости, изоморфным профилю скорости классического вихря Бюргерса–Ротта, а также с учетом диффузии углового момента – его обобщениям. В отсутствие диффузии углового момента дана интегральная оценка условий баланса тепла (плавучести) в вихревой модели при учете турбулентной теплопроводности и радиационного ньютоновского выхолаживания. Использовано интегрирование уравнения притока тепла (плавучести) (а) по всей бесконечной области, занятой вихревым течением, и (б) вдоль оси вихря. Показано, что в обоих случаях получается совпадающая оценка для радиуса максимума азимутальной скорости в вихре при турбулентном числе Прандтля $Pr_T \approx 0{,}87$. Сделана попытка приближенного рассмотрения тонкого приземного пограничного слоя под вихрем с учетом действия в слое механизмов турбулентной вязкости и интенсивной вертикальной конвекции. Обсуждается приложение полученных модельных результатов к атмосферным пыльным вихрям.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 25–17–00346).

Литература

1. Kurgansky M.V. Theoretical model of a baroclinic conical vortex. Eur. J. Mech. / B Fluids. 2025. Vol. 114. P. 204342. https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2025.204342.

Глобальная триполярная сетка с повышенным разрешением в Арктике: проектирование, интеграция в модель океана и адаптация вычислительного ядра

Ономриенко В.А.[1,2], Благодатских Д.В.[1,2], Ежкова А.А.[1,2], Яковлев Н.Г.[1,2]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
vonopr@ya.ru

Ключевые слова: *Арктика, океан, численное моделирование, генерация сеток*

Наш коллектив участвует в проекте № 25–77-31009 «Экстремальные погодно-климатические явления, связанные с ними последствия и риски в условиях быстрых изменений климата в Арктике». Задача — подготовить инструмент для моделирования климата океана в Арктике. Опираясь на опыт развития модели ИВМ РАН, мы адаптировали её для эффективных расчётов динамики океана в Арктике.

Моделирование климата глобально и требует длительных ансамблевых расчётов, что несовместимо с простым увеличением разрешения для качественного воспроизведения Арктики. Поэтому важна эффективность сетки: без избыточных узлов, но с хорошим разрешением Арктики и гладкостью и невырожденностью во всей глобальной области. Цель — глобальная, гладкая, невырожденная сетка с фокусом на Арктике и разрешением арктических проливов.

Сетка модели ИВМ РАН биполярная: один полюс — географический Южный, второй вынесен в Сибирь. Это избавляет от особенности в Северном Ледовитом океане, но сгущение приходится на сушу: севернее 65° с.ш. — около 5% ячеек, у других моделей со структурированными сетками — не более 10%. Перенос полюса в Гренландию не помогает: проливы севера Евразии оказываются вдали от сгущения. Поэтому мы перешли к триполярной сетке по подходам ORCA (NEMO). Принципы построения сеток ORCA не документированы; единственная цитируемая статья описывает биполярную сетку [1], отличную от ORCA.

Реализован генератор триполярных сеток; параметры и положения полюсов подобраны под все требования. Доля ячеек в Арктике увеличена до 15% при сохранении гладкости и невырожденности ORCA. Потребовались считывание рассчитанной сетки (координат узлов и метрических коэффициентов) из файла и адаптация граничных условий в динамическом ядре для бесшовной работы операторов у полюсов.

Тестовые расчёты по CORE-2 подтвердили физическую адекватность и бесшовную работу операторов через полярный разрез. Планируются длительные расчёты.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 25–77-31009.

Литература

1. Madec G., Imbard M. A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity //Climate Dynamics. – 1996. – Т. 12. – №. 6. – С. 381-388.

Волновые и лигаментные компоненты поверхностных течений в различных моделях гетерогенных жидкостей

Очиров А.А.
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
otchirov@mail.ru

Ключевые слова: *волны, лигаменты, структуры, дисперсионные соотношения, полные решения, асимптотические методы*

Исследование волновых возмущений на поверхности жидкости связано и с практическими, и с академическими приложениями. В частности, поверхностные волны играют важную роль во взаимодействии атмосферы и океана. Исследование формы, динамики и структуры поверхностных капиллярно-гравитационных возмущений сохраняет актуальность на протяжении длительного времени. При этом остается необходимость совершенствования аналитических методов описания поверхностных течений.

Все встречающиеся в природе жидкости гетерогенны и структурированы – на фоне устойчивой стратификации наблюдаются высокоградиентные струи и прослойки. Для описания динамики и структуры периодических течений в гетерогенных жидкостях необходимо опираться на систему фундаментальных уравнений с уравнением состояния (СФУ) [1]. СФУ определяет набор пространственных и временных масштабов задачи, варьирующихся в очень широких пределах.

В настоящей работе рассматривается задача о распространении поверхностных периодических возмущений стратифицированной жидкости. Обсуждаются различные редукции СФУ в линейном приближении для малых поверхностных возмущений [2]. С применением объединенной теории асимптотических возмущений [3, 4] получены полные дисперсионные соотношения и совокупности их регулярных и сингулярных корней в различных приближениях. В частности, использование приближения Буссинеска ограничивает возможность построения полных решений во всей области пространства, занимаемого жидкостью. Отказ от приближения Буссинеска приводит к появлению дополнительных слагаемых в дисперсионном соотношении и принципиальной возможности построения полных решений, содержащих регулярные волновые и сингулярные лигаментные компоненты течений. Прослеживаются дисперсионные зависимости полученных решений и проводится оценка влияния используемого приближения на значения фазовых и групповых скоростей волн и лигаментов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01124, https://rscf.ru/project/25-29-01124/

Литература

1. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. V. 10(4). 286.
2. Chashechkin Yu.D., Ochirov A.A. Dispersion of periodic flows on the surface of a viscous heterogeneous liquid // NHM. 2026. V. 21(4). P. 1227–1261.
3. Найфэ А. Введение в методы возмущений. М.: Мир. 1984. 535 с.
4. Y. D. Chashechkin, et.al. Regular and singular components of 2d periodic fluid flows on a surface of viscous stratified fluid // JHIT. 2025. V. 32(6). P. 26–37

Чувствительность общей циркуляции атмосферы и бароклинных волн к условиям на подстилающей поверхности

Фрик П.Г.[1], Сухановский А.Н.[1], Caflttdтепанов Р.А.[1], Быков А.В.[2], Ветров А.Л.[2], Калинин Н.А.[2]
[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*
[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
frick@icmm.ru

Ключевые слова: *общая циркуляция атмосферы, бароклинные волны, математическое моделирование, WRF-ARW*

Для выявления роли реальной структуры земной поверхности в формировании общей циркуляции атмосферы и бароклинных волн с помощью пакета WRF-ARW выполнены расчеты четырехлетней эволюции атмосферы на двух идеализированных зонально-однородных планетах земного типа (постановка и результаты расчетов для различных зонально-однородных постановок приведены в [1,2]) и в модели Земли с реальным распределением и рельефом суши, но с фиксированной температурой поверхности океана. В качестве модельных планет рассмотрены пустынная планета с экваториальным океаном и аквапланета. Результаты сравнивались с данными реанализа реальных атмосферных данных за 2013--2021гг. Основные характеристики циркуляции и бароклинных волн во всех случаях качественно подобны, но различаются широтным расположением и интенсивностью. Тип подстилающей поверхности определяет сезонные вариации основных характеристик. Они максимальны в случае пустынной планеты с экваториальным океаном и минимальны на аквапланете. В модели WRF-ARW с реалистичной конфигурацией поверхности и реанализе сильные сезонные вариации наблюдаются только в Северном полушарии, в средних широтах которого суша занимает значительную часть. В Южном полушарии, в котором большую часть средних широт занимает океан, сезонные изменения значительно слабее (на аквапланете они практически отсутствуют). Сезонные вариации в модели WRF-ARW для Южного полушария заметно слабее, чем в данных реанализа, что можно объяснить сглаживающим влиянием океана, температура которого в расчетах зафиксирована. Для анализа долготной локализации атмосферных возмущений использовалась среднеквадратичная амплитуда временных пульсаций меридионального ветра. Для реалистичной модели WRF-ARW и реанализа ее распределения качественно согласуются: модель воспроизводит локализацию зимних максимумов над северными частями Тихого и Атлантического океанов, а также почти непрерывную среднеширотную полосу в Южном полушарии.

Литература

1. Sukhanovskii A., Stepanov R., Bykov A., Vetrov A., Kalinin N., Frick P. Mid-latitude baroclinic waves in a zonally homogeneous Earth-like planet // Climate Dynamics. 2025. V.63. N.1. 74.
2. Фрик П.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н., Калинин Н.А., Ветров А.Л., Быков А.В. Общая циркуляция и бароклинные волны в атмосфере модельных зонально-однородных планет земного типа // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2025. Т.61. №.6. С.737-750.

Энергетика, динамика и структура атмосферных течений

Чашечкин Ю.Д.
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия
yulidch@gmail.com

Ключевые слова: *атмосфера, гетерогенная среда, потенциал гиббса, континуальное описание, поверхностная энергия, система фундаментальных уравнений, механика гетерогенных жидкостей, компоненты течений, регулярные и сингулярные решения*

Принципы логики включают необходимость определения сути предмета и метода изучения [1]. Атмосфера – подвижная гетерогенная среда, состоящая из смеси газов и паров, капель жидкостей, твердых частиц, биологических объектов, покрывает и вращающуюся твердую Землю с топографией, и гидросферу с океанами, пресноводными реками и водоемами. В классическом описании атмосферу, как и другие среды, характеризуют динамические уравнения состояния для потенциала Гиббса [2], его производных – плотности, давления, температуры, концентрации веществ и взвешенных частиц, мощности их источников и стоков, значения кинетических и других физических коэффициентов.

В континуальном описании пространство, время, сохраняющиеся величины – полная энергия, импульс, плотность, концентрация, давление, температура полагаются непрерывными. Потенциал Гиббса учитывает дискретную структуру материи и целлюлярную структуру распределения вещества. В среде непрерывно протекают встречные процессы конверсии энергии в ходе эволюции компонентов макромолекулярного строения вещества. Тепловая и механическая энергии переходят в потенциальную поверхностную энергию (ППЭ) при формировании новых ячеек с образованием замедленных струек. ППЭ оболочек исчезающих ячеек передается в наиболее тонкие компоненты течений и возмущения других величин. Для описания течений гетерогенной атмосферы привлекается система фундаментальных уравнений (СФУ) механики гетерогенных жидкостей [1].

Основу классификации компонентов течений составляют полные решения линеаризованной СФУ и ее редуцированных форм, полученные методами объединенной теории возмущений [4]. Регулярные решения СФУ описывают волны, вихри, струи, следы, сингулярные – тонкие лигаменты. Сингулярным компонентам соответствуют тонкие струйки, ориентированные вдоль, и короткие волокна – спикулы, направленные поперек интерфейсов [3]. Проводятся сравнения решений с результатами лабораторных исследований капельных и стратифицированных течений, наблюдений течений в атмосфере.

Литература

1. Chashechkin Y.D. // Axioms. 2021. V. 10(4). 286.
2. Feistel R. // Ocean Sci. 2018. V. 14. P. 471–502.
3. Чашечкин Ю.Д. // Изв. РАН. МЖГ. 2025. №1. С. 34–76.
4. Chashechkin Yu.D., Ochirov A.A. // NHM. 2026. V. 21(4). P. 1227–1261.

Long-term changes in the Northern Hemisphere marine cold air outbreaks during boreal winter

Lin Wang
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences
wanglin@mail.iap.ac.cn

Keywords: *marine cold-air outbreaks, sea ice retreat, turbulent heat fluxes, internal variability*

Marine cold-air outbreaks (MCAOs) occur when cold air flows over warmer open oceans, driving substantial air–sea heat exchange. This talk examines recent wintertime MCAO trends across the Northern Hemisphere, emphasizing the roles of sea ice retreat and atmospheric circulation and their implications for turbulent heat fluxes. Around the Arctic, MCAO frequency has increased significantly, accounting for over 80% of the wintertime turbulent heat flux trends in several regions. Sea ice retreat exposes additional open water, increasing weak and moderate MCAOs whose occurrence shifts with the ice edge. Strong and very strong MCAOs, however, remain comparatively stable in frequency and closely tied to the ice edge. Farther south, declining weak MCAOs dominate frequency decreases in the central North Pacific and subtropical central North Atlantic. These decreases are associated, respectively, with a weaker Aleutian low and a negative Pacific–North American pattern trend, and with a positive North Atlantic Oscillation trend and accompanying sea surface temperature tripole. Ocean surface warming offsets the reduced MCAO contribution to turbulent heat fluxes, leaving total flux trends statistically insignificant in these regions. Finally, CESM1 Large Ensemble simulations place these changes in the context of external forcing and internal variability. Both contribute to increasing MCAOs in Arctic and sub-Arctic regions. Across the North Pacific and North Atlantic, external forcing favors basin-wide decreases, while internal variability reshapes their spatial patterns and locally counteracts the forced decline. Together, these findings connect the physical mechanisms of MCAO changes with their attribution, highlighting how internal variability shapes the regional expression of externally forced trends.

Анализ климатических изменений и гидротермического режима в Центральной Азии (1982–2021 гг.)

Абдуллозода С.Ф.[1], Нодирзода К.А.[2]
[1]*Физико-технический институт им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан*
[2]*Кулябский государственный университет им. Носира Хусрава,Куляба, Таджикистан*
sabur.f.abdullaev@gmail.com

Ключевые слова: *столицы Центральной Азии, пустыня, Аралкум, Каракумы, Кызылкум, ледники Октябрь и Грумм - Гржимайло, температура, осадки, коэффициент увлажнения, коэффициент корреляции*

Исследование 40-летних климатических данных (1982–2021 гг.) выявило неоднородность температурных трендов в столицах Центральной Азии. Наиболее значительный рост среднегодовой температуры зафиксирован в Душанбе (+1,42 °C), Бишкеке (+0,80 °C), Ашхабаде (+0,65 °C) и Ташкенте (+0,37 °C). В Кабуле потепление составило +0,28 °C, тогда как в Астане отмечено снижение температуры на 0,30 °C. Во всех столицах наибольший прирост температур приходится на осенне-зимний период, а наименьший - на летний. Ключевыми факторами локального потепления выступают урбанизация (интенсивное строительство) и сокращение зеленых насаждений, снижающие альбедо подстилающей поверхности. Отрицательные и низкие тренды в Астане и Кабуле обусловлены их специфическим географическим положением.

Средние 40-летние температуры воздуха в Ашхабаде (15,23 ± 0,23 °C), Ташкенте (14,16 ± 0,20 °C), Бишкеке (13,50 ± 0,19 °C), Душанбе (13,40 ± 0,24 °C) и Кабуле (11,77 ± 0,49 °C) близки по значениям, в то время как в Астане этот показатель существенно ниже (3,17 ± 0,29 °C). Выявлена высокая корреляция сезонных температур между отдельными городами: Ашхабадом и Бишкеком (зима: r = 0,95; весна: r = 0,97; лето: r = 0,88), Душанбе и Ташкентом (осень: r = 0,83; весна: r = 0,78; лето: r = 0,88), Астаной и Ашхабадом (весна: r = 0,89), а также Ташкентом и Астаной (осень: r = 0,99).

На высокогорных ледниках Октябрь и Грумм-Гржимайло зафиксирован существенный рост среднегодовой температуры — на 1,60 °C и 1,45 °C соответственно, преимущественно в зимне-весенний период.

В пустынных экосистемах средние температуры за 40 лет составили: Каракумы — 14,49 °C, Кызылкум — 12,21 °C, Аралкум — 9,09 °C. За рассматриваемый период потепление составило +0,43 °C в Каракумах и +0,71 °C в Кызылкуме (наиболее выражено весной), тогда как в Аралкуме температурный режим оставался стабильным.

О применении асимптотических законов сохранения двумерной жидкости к анализу структурных изменений крупномасштабной динамики атмосферы при глобальном потеплении климата

Академик РАН Дымников В.П.[1], Крупчатников В.Н.[2,3], Градов В.С.[2]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*
[3]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
vkrupchatnikov@yandex.ru

Ключевые слова: *двумерная крупномасштабная динамика атмосферы, глобальное потепление, численное моделирование динамики климата, энергия, энстрофия*

В докладе формулируется асимптотический закон сохранения для динамики двумерной несжимаемой жидкости во вращающейся системе координат с внешним трением и форсингом специальной структуры, связывающий взвешенное по энергии динамическое волновое число, как некий функционал, с волновым числом форсинга. Обсуждается возможная реакция крупномасштабной атмосферной структуры на потепление климата. Этот функционал был использован для анализа структурных изменений динамики атмосферы при потеплении климата на основе данных, полученных в ходе численного моделирования с помощью глобальных климатических моделей. Сравнение динамики предложенного функционала с результатами детального изучения отклика атмосферы показало применимость сформулированной модели для решения поставленной задачи. Установлено, что данный функционал качественно правильно описывает структурные изменения крупномасштабной динамики атмосферы при потеплении климата.

Циклоническая активность в высоких широтах Северного полушария: изменения и последствия

Акперов М.Г.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
aseid@ifaran.ru

Ключевые слова: *атмосферные циклоны, реанализ, климатические модели, региональное моделирование, экстремальные осадки, ветроэнергетика*

В докладе представлены результаты исследований циклонической активности в высоких широтах Северного полушария в условиях современных и ожидаемых изменений климата на основе данных реанализа и результатов регионального климатического моделирования. Рассматриваются пространственно-временные особенности циклонической активности и тенденции изменения характеристик циклонов. Особое внимание уделяется оценке вклада циклонов в формирование атмосферных осадков, приземного ветра и ветрового волнения океана. В контексте изменений ветрового режима высоких широт рассматриваются также пространственно-временная изменчивость ветроэнергетического потенциала Арктики и его возможные изменения в XXI веке.

Ключевые сроки сокращения арктического морского льда в моделях CMIP: параметрический подход

Алдонина Т.А.[1,2], Семенов В.А.[1,2]
[1]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
matania.777@gmail.com

Ключевые слова: *Арктика, площадь морского льда, климатические модели CMIP, параметрическая аппроксимация*

Быстрое сокращение площади морского льда (ПМЛ) в Арктике – одно из ярких проявлений изменений климата. Несмотря на существенные неопределённости в прогностических оценках времени полного освобождения Арктики ото льда, большинство из них указывает на переход от многолетнего к сезонному ледяному покрову в ближайшие десятилетия, при этом наиболее ранний переход ожидается в сентябре – месяце наименьшей ПМЛ в годовом ходе. Оценки сроков достижения безлёдного состояния сильно различаются между моделями, что затрудняет согласованное сравнение результатов.

В настоящей работе для оценки ключевых сроков сокращения площади арктического морского льда в сентябре применена параметрическая аппроксимация функцией гиперболического тангенса с физически интерпретируемыми параметрами, что позволяет единообразно описать обусловленные внешним воздействием изменения площади льда и оценить ключевые моменты её динамики: год максимальной скорости таяния, начало и конец активного периода таяния, а также год перехода к свободной ото льда Арктике. Анализ проведён по ансамблям моделей трёх поколений проекта CMIP (CMIP3, CMIP5, CMIP6) при различных сценариях антропогенных выбросов за период XX-XXI вв. Показано, что медианный год достижения свободной ото льда Арктики в сентябре последовательно смещается к более ранним значениям от CMIP3 к CMIP6. Год максимальной скорости таяния сдвигается к более ранним срокам в CMIP5 и CMIP6 по сравнению с CMIP3. Продолжительность активного периода таяния и сроки перехода к стабильному минимуму площади льда также сокращаются от CMIP3 к CMIP6. Таким образом, от CMIP3 к CMIP6 проявляется систематический сдвиг к более раннему, быстрому и более синхронному сокращению площади арктического льда в сентябре. Безлёдное состояние Арктики при сценариях с наиболее высокими концентрациями выбросов в моделях CMIP5 и CMIP6 достигается уже в 2040-х годах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №25-77-31009).

Несоответствие моделируемых изменений климата широтному градиенту климатических условий Русской равнины

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

Ключевые слова: *изменение климата, безаналоговые климатические условия, моделирование климата*

Для характеристики климатических условий территории применяются различные показатели, в том числе среднегодовая температура воздуха (СГТ) и годовой слой осадков (ГКО). СГТ характеризует термический режим территории, а ГКО — количество поступающей влаги. Эти показатели используются в полуэмпирической модели чистой первичной продукции растительного покрова, известной как Miami NPP, где в соответствии с принципом Либиха предполагается, что в одних климатических условиях чистая первичная продукция (NPP) ограничивается недостатком тепла, а в других — недостатком влаги. Поэтому рассчитываются два значения NPP — по СГТ и по ГКО, — и из них выбирается меньшее. Из уравнений Miami NPP можно вывести кривую, вдоль которой обе оценки NPP совпадают друг с другом. Эта кривая разделяет в пространстве СГТ-ГКО область, где NPP ограничивается СГТ, и область, где NPP ограничивается ГКО. В области, где NPP ограничивается ГКО, повышение СГТ не повышает NPP. Однако при глобальном потеплении меняется не только СГТ, но и ГКО, а значит NPP может повышаться или понижаться в зависимости от изменения ГКО. Анализ результатов численных экспериментов на климатической модели INM-CM5 [1] показал, что изменение ГКО при сценарии SSP5-8.5 не соответствует широтному градиенту климатических условий Русской равнины, для которого характерна линейная взаимосвязь между СГТ и ГКО: ГКО снижается при повышении СГТ. На той части Русской равнины, где NPP ограничивается СГТ, ГКО при потеплении, предполагаемом сценарием SSP5-8.5, не снижается, а растет при повышении СГТ. Повышение ГКО при глобальном потеплении дает основания предполагать рост продуктивности растительного покрова в той части Русской равнины, где NPP ограничивается недостатком тепла. Вместе с тем оно указывает на необходимость выявления непредвиденных экологических последствий [2] несоответствия предсказываемого повышения ГКО широтному градиенту климатических условий.

Литература

1. Volodin E., Gritsun A. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 //Earth System Dynamics. – 2018. – Vol. 9. – №. 4. – P. 1235-1242.
2. Williams J.W., Jackson, S.T. Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises //Frontiers in Ecology and the Environment. – 2007. – Vol. 5. – P. 475-482. https://doi.org/10.1890/070037

Сценарные оценки изменения климатического индекса отопительной нагрузки в России до 2100 года

Александров Г.Г.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gleb@ifaran.ru

Ключевые слова: *изменение климата, климатический индекс, моделирование климата*

Для того, чтобы оценить влияние изменения климата на выбросы углекислого газа, связанные с потреблением энергии, требуемой для отопления жилого сектора, в работах [1] был введен и обоснован климатический индекс отопительной нагрузки (КИОН), определяющий взаимосвязь между удельным потреблением энергии (т.е. на 1 кв.м жилой площади в год), необходимым для поддержания предельно допустимой температуры в помещениях, и среднемесячными значениями температуры воздуха.

В данной работе исследовались возможные изменения КИОН на территории России в период 2015-2100 гг. для четырех сценариев изменения климата. Для этой цели использовались данные численных экспериментов, проведенных на модели INM-CM5 [2]. Получены, в частности, следующие результаты. При сценарии SSP1-2.6, КИОН для Москвы и Санкт-Петербурга возрастает со скоростью 0,08 и 0,09 кВтч/кв.м в год соответственно (т.е. примерно на 3% к 2100 году), а для Владивостока и Хабаровска наоборот снижается со скоростью 0,11 и 0,22 кВтч/кв.м в год соответственно (т.е. примерно на 5% и 6% к 2100 году). При сценариях SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 КИОН снижается во всех перечисленных городах на 12-38% к 2100 году: примерно на 18% в Москве, на 20% в Санкт-Петербурге, на 17% во Владивостоке и на 12% в Хабаровске в случае SSP2-4.5; примерно на 35% в Москве, на 33% в Санкт-Петербурге, на 23% во Владивостоке и на 18% в Хабаровске в случае SSP3-7.0; примерно на 38% в Москве, на 37% в Санкт-Петербурге, на 28% в Владивостоке и на 21% в Хабаровске в случае SSP5-8.5.

Согласно сценарным оценкам, КИОН существенно снизится в Москве, Санкт-Петербурге и других городах Европейской части России. Поскольку на такие оценки могут опираться решения по теплоснабжению городов, представляется целесообразным исследовать их надёжность исходя из теоретических представлений о предсказуемости отклика климатической системы на радиационный форсинг.

Благодарности и поддержка. Работа выполнена в рамках Госзадания № 125021001827-3

Литература

1. Александров Г. Г. Климатически обусловленный минимум потребности в энергии для отопления в городах центра европейской части России // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2020. — Т. 56, № 6. — С. 700–705.
2. Volodin E., Gritsun A. Simulation of observed climate changes in 1850–2014 with climate model INM-CM5 // Earth System Dynamics. — 2018. — Т. 9, № 4. — С. 1235–1242.

Влияние ТПО в низких широтах на предсказуемость межгодовых колебаний и аномалий климата

Алексеев Г.В., Харланенкова Н.Е., Глок Н.И., Смирнов А.В.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
alexgv@aari.ru

Ключевые слова: *климат, изменчивость, аномалии, предсказуемость, внешние воздействия, спектры, предсказуемость*

Низкочастотная изменчивость в океане инициирует долгопериодную часть изменчивости в атмосфере и может служить источником предсказуемости для межгодовых колебаний климата. Температура поверхности океана (ТПО) служит основным проводником влияния океана на атмосферу и климат, особенно ТПО в низких широтах океана, где накапливается основная часть солнечного тепла, поступающего к Земле и распространяющегося в умеренные широты и Арктику. Воздействие колебаний и аномалий низкоширотной ТПО проявляется в изменчивости климата умеренных и высоких широт. Мы показываем, что в формировании колебаний и аномалий низкоширотной ТПО участвуют колебания инсоляции низких широт, аномалии светимости Солнца (TSI) и облачности. При спектральном анализе климатических рядов месячных и годовых значений низкоширотной ТПО, индексов AMO, NINO, характеристик атмосферы, океана, морских льдов, светимости Солнца, инсоляции низких широт выделены значимые максимумы на близких периодах в диапазоне от 2 до 120 лет. Вклад соответствующих квазипериодических составляющих вместе с трендом глобального потепления в межгодовую изменчивость среднегодовых значений составляет от 70 до 90%, что указывает на предсказуемость значительной её части. Показано также, что аномалии климата, такие как внезапные потепления 2023 и 2024 годов, события Эль-Ниньо, аномально жаркое лето 2026 года в Европе и другие связаны с аномалиями светимости Солнца (TSI) и тропической облачности.

Вклад естественных и антропогенных факторов внешнего воздействия на климат в изменения характеристик волн жары на Европейской территории России в период 1850-2100 гг. по данным экспериментов DAMIP

Алешина М.А.[1,2], Семенов В.А.[1,2]
[1]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
aleshina@igras.ru

Ключевые слова: *волны тепла, CMIP6, DAMIP, антициклоны*

Проведен анализ основных характеристик летних волн жары с использованием данных климатических моделей CMIP6 и проекта DAMIP в 1850-2100 гг. на Европейской территории России. Использование трех серий экспериментов DAMIP (nat – учет естественных факторов, aer – изменение аэрозолей и ghg – изменение концентраций долгоживущих парниковых газов) позволило выделить вклад каждого фактора в изменение характеристик волн жары. Для анализа циркуляционных условий в дни волн жары были построены пространственные композиты полей геопотенциала. Общая продолжительность волн жары в 20 столетии в среднем на ЕТР значимо не различается между сериями экспериментов и составляет 5-10 дней/сезон, к концу 21 столетия возрастает до 20-30 дней/сезон только по экспериментам ssp245 и ssp245-ghg, при этом характеристики волн жары значимо не изменяются к концу века в экспериментах, учитывающих исключительно вклад естественных факторов или аэрозолей. Это указывает на то, что ключевым фактором долгопериодных изменений режима волн жары на ЕТР является эмиссия парниковых газов и связанное с этим увеличение температур, в т.ч. экстремальных. Увеличение продолжительности волн жары в экспериментах ssp245 и ssp245-ghg сопровождается увеличением высот геопотенциальных поверхностей в дни волн жары. Полученное увеличение сильнее выражено в средней тропосфере на уровнях 700 и 500 гПа и свидетельствует об увеличении слоя теплого воздуха и формировании более мощных высотных гребней и блокирующих антициклонов над ЕТР.
Таким образом, увеличение продолжительности и интенсивности волн жары в первую очередь связано с общим термодинамическим прогревом атмосферы из-за повышения концентрации парниковых газов. Усиление волн тепла к концу 21 столетия также сопровождается повышением высот геопотенциальных поверхностей, что говорит о вероятных изменениях в повторяемости и интенсивности квазистационарных циркуляционных систем (высотных гребней и блокирующих антициклонов).

Ансамблевые краткосрочные региональные прогнозы на основе модели ICON с использованием отечественной входной информации

Астахова Е.Д., Бундель А.Ю.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
elena_ast_hmc@mail.ru

Ключевые слова: *мезомасштабный, ансамблевый прогноз, ICON*

В Гидрометцентре России разработана и реализована система мезомасштабного ансамблевого прогноза ICON-Ru2-EPS [1, 2]. Система основана на модели ICON с шагом сетки по горизонтали около 2,2 км, 65 вертикальными уровнями до высоты около 22 км, с явным разрешением глубокой конвекции и параметрическим учетом основных физических процессов подсеточного масштаба. Область интегрирования - Центральный Федеральный округ (ЦФО).
В 2025-2026 гг. подготовлена новая версия системы, использующая отечественную прогностическую продукции для генерации начальных/граничных условий. Ключевой особенностью новой версии является гибридная генерация возмущенных условий: в качестве базового фона используется глобальный детерминированный прогноз по модели ICON (конфигурация ICON-Ru13/6N29), а структура крупномасштабной неопределенности импортируется посредством наложения возмущений полей температуры, влажности и компонент скорости ветра из глобальной ансамблевой системы на основе полулагранжевой модели ПЛАВ (EnSL-AV).
Выполнены численные эксперименты с целью оценки применимости предложенного алгоритма генерации начальных и граничных условий и анализа качества прогностической продукции с помощью новой версии системы ICON-Ru2-EPS. Рассматривались прогнозы как с возмущением начальных и граничных условий, так и с возмущениями самой модели (с помощью стохастических возмущений физических тенденций SPPT). Результаты экспериментов были верифицированы относительно данных синоптических наблюдений на станциях с помощью пакета METplus. Анализ результатов верификации позволяет сделать вывод о применимости разработанного алгоритма подготовки начальных и граничных условий для системы ICON-Ru2-EPS на основе отечественной продукции и о хорошем качестве вероятностных прогнозов, полученных с применением этого алгоритма для весеннего периода (май).

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы Росгидромета по теме с регистрационным номером 125032004255-7 Проекта 1.1 2025-2029.

Литература

1. Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Алферов Д.Ю., Розинкина И.А., Ривин Г.С. О применении ансамблевых методов в краткосрочных региональных прогнозах//Гидрометеорологические исследования и прогнозы.–2025.– № 1 (395).–С. 6-36.– https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-6-36
2. Astakhova,E.D., Bundel,A.Y., Alferov,D.Y. et al. On the Application of Ensemble Methods in Short-range Regional Forecasting//Russ. Meteorol. Hydrol.–2026.–Vol. 51 (Suppl 1)– P. S1–S16. – https://doi.org/10.3103/S1068373926130017

Пространственное распределение и изменчивость струйных течений в Атлантико-Евразийском регионе за 1980–2024 гг.

Безотеческая Е.А.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*
eabezotecheskaya@aari.ru

Ключевые слова: *высотное струйное течение, ядро струйного течения, извилистость струйного течения, ERA5*

Струйные течения (СТ) в верхней тропосфере образуют две основные системы – субтропическую и полярно-фронтовую, которые различаются механизмами формирования и характеристиками, но при этом часто сливаются. Существующие оценки извилистости СТ и её изменений в последние десятилетия остаются противоречивыми. Отчасти это связано с тем, что используемые методики неэквивалентны, а большинство из них представляет СТ в виде единой непрерывной линии. Такое допущение плохо выполняется в секторах, где СТ часто фрагментируются и ветвятся.

По данным реанализа ERA5 за 1980–2024 гг. построена климатология повторяемости ядер СТ по месяцам в Атлантико-Евразийском регионе с применением метода трёхмерного выделения ядер, учитывающего отклонение потока от зонального направления. Выявлены два периода со сходным пространственным распределением: с ноября по апрель и с июня по сентябрь. Май и октябрь являются переходными месяцами. Весной субтропическое и полярно-фронтовое СТ становятся пространственно различимыми как в географическом, так и в вертикальном распределении, тогда как осенью такого разделения не происходит.

На основе этих результатов выделена область, в которой полярно-фронтовое СТ можно рассматривать отдельно от субтропического. Предложена характеристика извилистости, которая рассчитывается только в узлах сетки, относящихся к ядру СТ, и поэтому описывает ориентацию СТ, а не окружающего потока. Извилистость максимальна в июне и резко уменьшается в следующем месяце. Наиболее интенсивные ядра ориентированы преимущественно зонально, при этом сезонные ходы извилистости и интенсивности не совпадают. За 1980–2024 гг. получен статистически значимый тренд к более зональной ориентации полярно-фронтового СТ в мае и тенденция того же знака в марте, тогда как в остальные месяцы значимых изменений не выявлено.

Анализ данных и исследование выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00273).
Метод разработан в рамках государственного задания № 125020501536-2.

Особенности динамики Эль-Ниньо в нелинейной модели Recharge Oscillator

Бекряев И.Р.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ibekryaev@mail.ru

Ключевые слова: *Эль-Ниньо, recharge oscillator, нелинейность, бьеркнесовская обратная связь, предельный цикл*

Эль-Ниньо – важнейшее явление межгодовой изменчивости климата. Среди простых концептуальных моделей Эль-Ниньо выделяется Recharge Oscillator. Одна из версий этой модели [1] содержит кубическую нелинейность:

$dT / dt = RT + F_1 h + cT^3 + \sigma_T \xi_T$,

$dh / dt = -\varepsilon h - F_2 T$,

где: T – аномалия температуры поверхности океана в восточной части экваториального Тихого океана; h – аномалия глубины термоклина в центральной и западной частях экваториального Тихого океана; ξ_T – стохастическое атмосферное воздействие (красный шум); σ_T – амплитуда красного шума; R – бьеркнесовская обратная связь; F_1 – эффективность термоклинной и адвективной обратных связей; F_2 – эффективность загрузки/разгрузки; c – параметр кубической нелинейности.

Согласно работе [2] параметр R может значительно различаться в тёплых и холодных климатах, причём в тёплых климатах R может быть больше.

Нами показано, что при σ_T = 0 (детерминированная система) модель сводится к уравнению Льенара. При $R \leq (F_1 F_2)/\varepsilon$ в системе имеется только одно стационарное решение (тождественно-нулевое). При $R - \varepsilon < 0$ оно устойчиво, при $R - \varepsilon > 0$ неустойчиво. Мы определили, что бифуркация при $R - \varepsilon = 0$ является суперкритической.

С использованием теоремы Льенара было доказано, что при $\varepsilon < R < (F_1 F_2)/\varepsilon$ в системе существует единственный устойчивый предельный цикл вокруг нуля. Его амплитуда при малом положительном значении $R - \varepsilon$ пропорциональна $\sqrt{R - \varepsilon}$. При достаточно больших значениях R предельный цикл представляет собой релаксационные колебания.

Также было рассмотрено поведение системы со стохастическим форсингом. Корреляционные функции T и h при увеличении параметра $R - \varepsilon$ становятся близки к медленно затухающим синусоидам.

Таким образом, при увеличении параметра R, характеризующего Бьеркнесовскую обратную связь, модель Recharge oscillator предсказывает усиление периодичности смены явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также увеличение их амплитуды.

Литература

1. Vialard, J. The El Niño Southern Oscillation (ENSO) recharge oscillator conceptual model: Achievements and future prospects / J. Vialard, F.-F. Jin, M. J. McPhaden [и др.] // Reviews of Geophysics. – 2025. – Т. 63, № 1. – С. e2024RG000843. – DOI 10.1029/2024RG000843.

2. Thirumalai, K. Future increase in extreme El Niño supported by past glacial changes / K. Thirumalai, P. N. DiNezio, J. W. Partin [и др.] // Nature. – 2024. – Т. 634, № 8033. – С. 374–380. – DOI 10.1038/s41586-024-07984-y.

О проблемах предсказуемости изменений климата

Бекряев Р.В.
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия
bekryaev@mail.ru

Ключевые слова: *климат, предсказуемость, tipping points, splitting, озёра Вада*

Привычная парадигма предполагает детерминированный и однозначный отклик климатической системы на изменения внешнего воздействия, однако, ряд недавних результатов заставляет по-новому взглянуть на предсказуемость климата. В докладе обсуждаются три обстоятельства, омрачающих перспективы предсказания будущего состояния климатической системы.

Первое из них связано с проблемой предсказания Tipping Points (критических переходов), поскольку прогнозы, основанные на концепции критического замедления (Critical Slow Down) эффективны при анализе простых систем, однако для климатической системы не всегда обоснованы.

Второй источник неопределённости климатических прогнозов связан с так называемым расщеплением (splitting) траекторий. Численные эксперименты с рядом климатических моделей продемонстрировали, что в зависимости от начального состояния фазовая траектория может приходить в то или иное статистически устойчивое состояние. Предсказать какой именно режим реализуется проблематично.

Третья проблема связана с потенциальной возможностью существования в фазовом пространстве климатической системе сложных областей притяжения, в частности, бассейнов Вада. Бассейны (озера) Вада обнаружены в системе Lorenz-84, описывающей взаимодействие планетарных атмосферных волн с западно-восточным переносом. Озёра Вада могут возникать при одновременном наличии в системе трёх и более аттракторов. Уникальное свойство этих озёр заключается в том, что в любой, сколь угодно малой окрестности точки, принадлежащей какому-либо аттрактору, присутствуют области притяжения ко всем аттракторам. Такая особенность означает практическую невозможность детерминированного прогноза. Наличие нескольких устойчивых режимов, обнаруживаемых в климатических моделях и в палео-реконструкциях, означает в случае озёр Вада не только потерю климатической предсказуемости, но и гипотетическую (хотя и маловероятную) возможность перехода в режим холодного климата при увеличении содержания парниковых газов.

Исследование выполнено при поддержке мегагранта РНФ №22-77-31008 ("Океанские механизмы климатических изменений и предсказуемость климата Евразии").

Результаты сопоставления характеристик снежного покрова по данным реанализа ERA5-Land и спутникового прибора MODIS

Белов А.Е., Парфёнова М.Р., Аржанов М.М., Ракитин В.С.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
y.beloff2013@yandex.ru

Ключевые слова: *снежный покров, альбедо поверхности, дистанционное зондирование, валидация, MODIS, ERA5-Land*

Рассмотрены вариации снежного покрова в Евразии по данным спутникового прибора MODIS (col. 6.1, MOD10C1, переменная Day CMG Snow Cover, 0.05°×0.05°) и расчётам реанализа ERA5-Land (1.0°×1.0°). MODIS и ERA5 предоставляют результаты в виде процентного заполнения ячейки снежным покровом (0-100%). Орбитальные данные приняты за эталон, относительно них выполнена валидация ERA5.

Исследована взаимосвязь между снежным покровом и спутниковыми измерениями альбедо поверхности (TROPOMI, переменная Surface Albedo, λ=758 нм).

Сопоставление проводилось на двух уровнях – глобальном (домен «Евразия», 0°-180° с.ш./0°-90° в.д.) и региональном «Таймыр» (60°−80° с.ш./90°−120° в.д). В первом случае данные MODIS и ERA5 усреднялись до разрешения 5°×5°; во втором − с пространственным усреднением 1°×1°.

В качестве анализируемого периода был взят 2020 год и несколько его сезонов, характеризующихся разной степенью наличия снежного покрова – зимний период (январь-февраль), весенний (март-апрель) и осенний (октябрь-ноябрь).

Для каждого из указанных доменов и сезонов получены характеристики корреляции (параметры уравнения линейной регрессии) между величинами снежного покрова, измеренными при помощи MODIS и полученными методом реанализа. Параметры соответствия значительно варьируют, в зависимости от сезона и домена. Так, для домена «Евразия» значение коэффициента корреляции R составляло 0.90 в зимний период и 0.93 в весенний. Для под-домена «Таймыр» для этих же периодов корреляция низка.

Предложены способы фильтрации данных ERA5 и MOD10C1, направленные на исключение из массива нереалистично низких значений. В докладе обсуждается эффективность предлагаемой фильтрации.

Также были рассчитаны тренды величины снежного покрова по данным MODIS и ERA5-Land для Евразии за 2 периода – 2000−2012 гг. и 2013−2025 гг. Выполнено сопоставление оценок трендов на глобальном и региональном уровнях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-77-00113.

Литература

1. S5P L2 PUM Methane SRON-S5P-LEV2-MA-001 issue 2.4.0, 2022-07-11 – released
2. S5P L2 PUM Nitrogendioxide S5P-KNMI-L2-0021-MA issue 4.0.0, 2020-12-01 – released
3. Climate Data Store URL: https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land
4. National Snow and Ice Data Center URL: https://nsidc.org/data/MOD10C1

Региональный анализ на основе конвективно-разрешающей конфигурации COSMO-Ru с шагом 2,2 км

Блинов Д.В., Шувалова Ю.О., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Смирнов А.В.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
denisblinov@ya.ru

Ключевые слова: *региональный анализ, реанализ, усвоение данных, система COSMO-Ru, ДМРЛ, конвективные явления*

В глобальных гидродинамических прогнозах и реанализах осадки воспроизводятся недостаточно точно. Это связано с использованием гидростатического приближения и параметризации конвекции в глобальных моделях.

В Гидрометцентре России создана региональная система усвоения данных (РСУД) на основе конвективно-разрешающей конфигурации негидростатической модели COSMO [1]. РСУД использует реализованные в модели методы непрерывного усвоения данных — nudging и Latent Heat Nudging, позволяющие учитывать данные высокого временного разрешения без пространственно-временного осреднения. По аналогии с зарубежными оперативными системами детализированного численного прогноза погоды [2] в оперативном режиме ежечасно РСУД подготавливает начальные данные для системы сверхкраткосрочного прогноза COSMO-Ru2By с горизонтальным шагом сетки 2,2 км для Европейской части России.

В ретроспективном режиме используются наблюдения, поступающие со значительной задержкой. Таким образом используются данные с аэрологических и метеорологических станций (в том числе автоматических), аэродромов, самолётных измерений, метеорологических температурных профилемеров, радиолокаторов.

Установлено, что при усвоении радиолокационных данных успешность воспроизведения часовых сумм осадков в окрестности 30 км возрастает с 0,55 до 0,81 по показателю Fraction Skill Score. Поля регионального анализа воспроизводят сопутствующие сильным конвективным осадкам локальные возмущения температуры, давления и ветра, диагностические показатели сильных порывов ветра, гроз, града, суперячеек и смерчеопасных ситуаций.

Рассматривается потенциал повышения точности анализа за счет использования спутниковых данных об интенсивности осадков и перехода на модель ICON. Разработанная РСУД может стать прототипом системы регионального реанализа для территории России. Исследование выполнено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета на 2025-2029 гг. (регистрационный номер 125032004255-7).

Литература

1. Блинов Д. В., Ревокатова А. П., Ривин Г. С. Усвоение данных наблюдений в системе краткосрочного численного прогноза погоды COSMO-Ru Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2024. № 7. С. 68–80. doi:10.52002/0130-2906-2024-7-68-80
2. Dowell D. C. et al. The High-Resolution Rapid Refresh (HRRR): An hourly updating convection-allowing forecast model. Part I: Motivation and system description // Weather and Forecasting. 2022. Vol. 37, no. 8. P. 1371–1395. doi:10.1175/WAF-D-21-0151.1

Поиск устойчивых метеорологических режимов формирования опасных конвективных явлений на территории России методами кластеризации

Блинов П.Д.[1,2], Чернокульский А.В.[1,2], Бугримов А.В.[1], Ярынич Ю.И.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*НИУ "Высшая школа экономики", Москва, Россия*
pdblinov@edu.hse.ru

Ключевые слова: *град, кластеризация, HDBSCAN, K-means, PCA, режимы формирования*

Опасные конвективные явления, включая крупный град, наносят значительный экономический ущерб и требуют объективной категоризации условий формирования. В докладе будет представлен анализ подходов к кластеризации случаев крупного града (≥2 см) на территории России по метеорологическим переменным (предикторам). Используется база наблюдений за 1996–2024 гг., агрегирующая данные наземных наблюдений, сообщения очевидцев и СМИ, научные публикации [1]; после пространственно-временного объединения наблюдений (≤4° и ≤3 ч) формируется набор случаев крупного града [2]. Для каждого случая рассчитываются конвективные индексы по реанализу ERA5 [3] как максимум в окрестности 100 км. Предобработка включает исключение признаков с пропусками >50%, робастную стандартизацию, анализ мультиколлинеарности и кластеризацию признаков методом Affinity Propagation [4] по корреляции Спирмена с отбором репрезентативных параметров. Далее применяются метод главных компонент, алгоритмы K-means [5] и HDBSCAN [6], а также проверка устойчивости кластерной структуры с помощью бутстрап-рандомизации и синтетической нулевой выборки (гауссова копула, сохраняющая маргинальные распределения и ковариационную структуру). Методика направлена на снижение субъективности экспертных классификаций и контроль ложноположительного обнаружения кластеров. В докладе будут представлены результаты разведочного анализа, сравнения алгоритмов и верификации кластерной структуры.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 24-17-00357.

Литература

1. Бугримов и др. Градовые события в России. М., 2024;
2. Blinov P.D. et al. Intercomparison of ML and Ingredient-Based Approaches for Identifying Hail-Prone Conditions. Moscow Univ. Phys. Bull. 2025. 80(S3):S1180–S1193;
3. Hersbach H. et al. ERA5 Reanalysis. QJRMS 2020. 146:1999–2049;
4. Frey B.J., Dueck D. Clustering by passing messages between data points. Science 2007. 315:972–976;
5. MacQueen J. Proc. Berkeley Symp. 1967. 1:281–297;
6. Campello R.J.G.B. et al. ACM TKDD 2015. 10:1–51.

Воспроизведение Атлантической мультидекадной и Тихоокеанской декадной осцилляций в моделях CMIP6 и их связь с приземной температурой воздуха и морским льдом Арктики

Бокучава Д.Д.[1], Мальцева А.С.[2], Алдонина Т.А.[1,3], Семенов В.А.[1,3]
[1]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
d.bokuchava@gmail.com

Ключевые слова: *AMO, ТДО, CMIP6, Арктика, морской лёд, приземная температура воздуха, внутренняя изменчивость климата.*

Оценено воспроизведение Атлантической мультидекадной (AMO) и Тихоокеанской декадной (ТДО) осцилляций в ансамбле из 53 моделей CMIP6 и связанный с ними отклик приземной температуры воздуха (ПТВ) и сентябрьской концентрации морского льда Арктики.

Индексы AMO и ТДО и характеристики морского льда получены по данным наблюдений HadISST, приземная температура воздуха — по данным HadCRUT5. Воспроизведение индексов оценено по диаграмме Тейлора, отклик — методом регрессии полей на нормированные индексы.

Амплитуда AMO занижена в 32 моделях из 53, медианное по ансамблю отношение стандартных отклонений равно 0,94, для ТДО — 1,00, что согласуется с [1]. По воспроизведению обоих режимов и по характеристикам арктической ПТВ отобраны пять моделей — ACCESS-CM2, TaiESM1, CAS-ESM2-0, CESM2-FV2 и FGOALS-f3-L.

Отклик ПТВ на AMO положителен во всех пяти моделях и объясняет 35–44 % низкочастотной изменчивости арктической ПТВ, вклад ТДО не превышает 8 %. Модели различаются не величиной отклика, а его пространственным распределением.

Вклад AMO в низкочастотную изменчивость концентрации арктического морского льда составляет по наблюдениям 18,7 %, тогда как модельные значения превышают эту оценку в 1,4–2,3 раза. Это указывает на то, что оценки вклада внутренней изменчивости в сокращение арктического льда, получаемые по моделям CMIP6 [2], вероятно, завышены. Воздействие ТДО на сентябрьскую концентрацию льда статистически не обнаруживается.

Наилучшее согласие с данными наблюдений по ледовым характеристикам даёт TaiESM1, по температурным — ACCESS-CM2, при этом ни одна из отобранных моделей не воспроизводит обе группы характеристик (температурные и ледовые) одинаково хорошо. Качество воспроизведения режима изменчивости не определяет качество воспроизведения арктического отклика на него.

Литература

1. Yan X. et al. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. doi:10.1029/2018GL077378.
2. Notz D., SIMIP Community // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. e2019GL086749.

Анализ радиационных форсингов для модели Земной системы ARTS-ESM-L в рамках проекта CMIP7

Брагина В.В.[1,2,3], Володин Е.М.[1]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
VVorobyeva@yandex.ru

Ключевые слова: *эффективный радиационный форсинг, мгновенный радиационный форсинг, модель Земной системы, ARTS-ESM-L, CMIP7*

Оценка радиационного форсинга является фундаментальной задачей при исследовании механизмов антропогенных и естественных климатических изменений. Ранее для моделей семейства INMCM анализировались только отклики климатической системы, тогда как диагностика лежащих в их основе радиационных воздействий оставалась вне поля зрения. В рамках новой фазы международного проекта по сравнению климатических моделей CMIP7 [1] для национальной модели Земной системы ARTS-ESM-L [2] впервые проведена комплексная диагностика эффективного (ERF) и мгновенного (IRF) радиационных форсингов.

На основе расчетов в режиме совместной модели и режиме AMIP получены оценки ERF для современных и исторических условий как для индивидуальных воздействий, так и для групп воздействий. Проведено сравнение результатов с моделями CMIP5/6 и оценочным докладом IPCC AR6. Показано, что значения ERF из экспериментов с совместной моделью меньше значений ERF из расчетов в формате AMIP, что обусловлено временной изменчивостью параметра климатической обратной связи.

Выявлены важные отличия в радиационных форсингах проекта CMIP7 от проекта CMIP6 вследствие различия предписываемых воздействий. В частности, показано смещение области наибольшего отрицательного антропогенного радиационного форсинга из регионов Китая и Юго-Восточной Азии в сторону Индостана и Аравийского моря. Кроме того, учет вулканических аэрозолей в тропосфере согласно протоколу CMIP7 приводит к заметному сглаживанию минимумов глобального радиационного форсинга после крупных извержений вулканов.

Интегральное значение IRF вследствие учетверения концентрации CO_2 по сравнению с прединдустриальным уровнем, а также структура его пространственного и вертикального распределения хорошо согласуются с результатами климатических моделей, участвовавших в проектах CMIP5 и CMIP6.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке РНФ (грант № 25-17-00203).

Литература

1. Dunne J., Hewitt H., Arblaster J. M. et al. An evolving Coupled Model Intercomparison Project phase 7 (CMIP7) and Fast Track in support of future climate assessment // Geoscientific Model Development. 2025. Vol. 18. P. 6671-6700. DOI:10.5194/gmd-18-6671-2025

2. Volodin E., Chernenkov A., Tarasevich M. et al. Earth system model ARTS-ESM-L: basic properties, simulation of present climate and historical climate changes. // Research Square [preprint]. 2026. DOI: 10.21203/rs.3.rs-8969494/v1

Климатология крупного града в Северной Евразии

Бугримов А.В.[1,2], Чернокульский А.В.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
alexceybug@gmail.com

Ключевые слова: *град, крупный град, база данных*

Град относится к опасным конвективным явлениям, изучение которых необходимо для оценки климатических рисков и совершенствования прогнозов [1]. Представлены результаты созданной единой базы данных града в России, включая крупный град ($D \geq 2$ см) [1, 2]. База охватывает 1828–2025 гг. и содержит 15 285 сообщений из станционных наблюдений, научных и исторических источников, а также от очевидцев. Для более 13 тыс. случаев известен размер градин. На крупный град приходится 8166 случаев, или 60,9 % сообщений. Более 97 % сообщений приходится на 1995–2025 гг., что прежде всего отражает увеличение частоты регистрации. Основной пространственный максимум расположен на Северном Кавказе, а также в центре Европейской России и на юге Сибири. Неоднородность распределения связана как с условиями развития конвекции, так и с плотностью наблюдений. На май–август 95,5 % случаев крупного града. Максимум наблюдается в июне; суточный максимум — в 15–17 ч местного времени. Медианный максимальный диаметр крупного града составляет 3,0 см. Для всей выборки и станционных наблюдений медианы равны 2,0 и 0,8 см, а 95-е процентили — 5,0 и 2,8 см соответственно. Различия выборок отражают неодинаковую полноту регистрации мелкого и крупного града. Медианная продолжительность выпадения составляет 15 мин. Для 759 случаев документированы последствия, чаще всего — повреждения растительности. Максимальный диаметр недостаточен для характеристики суммарных потерь. Результаты служат основой для изучения условий формирования града, проверки модельных оценок и районирования градоопасности. Выделение климатических изменений требует учёта наблюдательной неоднородности.

Литература

1. Pustovalov K.N. et al. Lightning Activity Accompanying Hail Events in Russia in 2016–2024 // Pure Appl. Geophys. 2026. 183. 875–892.
2. Blinov P.D. et al. Intercomparison of Machine Learning and Ingredient-Based Approaches for Identifying Hail-Prone Weather Conditions over Russia // Moscow Univ. Phys. Bull. 2025. 80(S3). S1184–S1197.

Оценки прогноза количества осадков и отражаемости в модели COSMO-Ru2By с помощью пространственных методов верификации

Бундель А.Ю., Блинов Д.В.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
a.bundel@gmail.com

Ключевые слова: *пространственные методы верификации, радиолокационная отражаемость, система COSMO-Ru, вейвлеты*

Оценка по пространственным долям FSS [1] и метод разложения ошибки по масштабам с помощью вейвлет-фильтра [2] применены к прогнозам количества осадков и радиолокационной отражаемости по мезомасштабной модели COSMO-Ru2By с усвоением радарных данных и без усвоения. В качестве данных наблюдений используется композит радиолокационных данных, подготавливаемый ФГБУ «ЦАО». Период сравнения – июль 2022 г. В моделях COSMO и ICON отражаемость рассчитывается на основе информации о содержании гидрометеоров (водность и ледность облаков, жидкие и твердые осадки, снежная крупа), предоставляемой микрофизическим блоком. Таким образом, отражаемость диагностирует целый комплекс опасных явлений конвективной природы, поэтому ее прогноз и оценка очень важны. Сравниваются оценки для сопоставимых пороговых значений количества осадков и отражаемости. Делаются некоторые оценки длительности периода полезного прогноза для окрестностей разного масштаба. Сделан вывод о значительном улучшении прогноза с усвоением радарных данных в первые несколько часов прогноза. Использование различных метрик качества, в частности метода разложения ошибки по масштабам, позволяет выделить тонкую структуру ошибок в прогностических полях. В то же время, длительность эффекта усвоения подтверждается разными методами, что дает бóльшую уверенность в правильности ее определения.

Литература

1. Roberts, N. M. and Lean, H. W.: Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events, Monthly Weather Review, 136, 78 – 97, https://doi.org/10.1175/2007MWR2123.1, 2008.
2. Casati B., Ross G., Stephenson D.B. A New intensity-scale verification approach for the verification of spatial precipitation forecasts // Meteorol. Appl. – 2004. – Vol. 11. – P. 141–154.

Нейросетевой подход к кластеризации и оценке предсказуемости структур атмосферной циркуляции и связанных с ними волн тепла в Северной Евразии

Вильфанд Р.М., Куликова И.А., Хан В.М., Макарова М.Е.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
romanvilfand@mail.ru

Ключевые слова: *структура атмосферной циркуляции, нейросетевой подход, самоорганизующиеся карты Кохонена, климатические модели, волны тепла, зональный перенос, блокирование*

Рассматривается применение самоорганизующихся карт Кохонена (SOM) для кластеризации крупномасштабных структур атмосферной циркуляции, связанных с волнами тепла в Северной Евразии, и оценки способности климатической модели ИВМ РАН (INM-CM6) их воспроизводить. Использованы поля аномалий геопотенциала 500 гПа (H500) и индексы волн тепла WSDI с суточным разрешением по реанализу ERA5 и ретроспективным прогнозам INM-CM6 за летние периоды 1991–2020 гг.
Тестировались сетки SOM от 6 до 20 узлов, каждая обучалась 1000 раз со случайной инициализацией. Качество оценивалось по ошибке квантования, топографической ошибке и карте Саммона. Наилучший баланс критериев при сохранении физической интерпретируемости показала сетка 3×3. SOM-анализ выявил девять летних режимов циркуляции, два из которых охватывают 35,2 % эпизодов. Первый соответствует ослабленному зональному переносу и блокированию с мощным гребнем в высоких широтах, максимумы повторяемости волн тепла приходятся на арктическое побережье Сибири. Второй - аномально низкий геопотенциал над Арктикой и блокирующие антициклоны над Уралом и Западной Сибирью.
Для оценки качества модельные данные классифицировались по сходству со структурами реанализа. Показателями качества воспроизведения служили коэффициент корреляции (R), RMSE, MAE и разность встречаемости узлов. Значимость оценок проверялась бутстрепом. Модель корректно воспроизводит структуру крупномасштабной циркуляции (R = 0.94), но занижает амплитуду аномалий H500 на 36 %. Частоты режимов сильно расходятся: более 50 % ситуаций отнесено к режиму слабого зонального потока, блокирующие структуры теряются. Как следствие, занижение температурных экстремумов и неудовлетворительное воспроизведение волн тепла (R = 0.34), повторяемость дней с волнами тепла завышена в среднем в 1.83 раза. Делается вывод, что SOM-анализ полезен как для анализа климатических особенностей волн тепла, так и для верификации климатических моделей.

Вклад вариаций солнечной постоянной в климатическую изменчивость: от механизмов полярного усиления до пределов предсказуемости

Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г.
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия
dmitry.volobuev@mail.ru

Ключевые слова: *полный поток солнечного излучения (TSI), обратная задача теплопроводности, полярное усиление, причинный анализ, метод условных дисперсий, горизонт предсказуемости, нелинейная динамика, Эль-Ниньо (ENSO), климатический шум*

Влияние вариаций полного потока солнечного излучения (TSI) на климатическую систему обычно считается пренебрежимо малым по сравнению с энергией внутренней изменчивости атмосферы и океана, но выявление этого сигнала важно для корректной атрибуции естественной изменчивости климата и оценки фундаментальных пределов его предсказуемости.

В докладе предложен комплексный подход к анализу солнечно-климатических связей, основанный на переходе от анализа приземной температуры к расчету плотности вертикального теплового потока (HFD) посредством решения обратной задачи теплопроводности с учетом кажущейся тепловой инерции подстилающей поверхности. Для верификации физических механизмов мы применили метод условных дисперсий, позволяющий выявлять направленность причинно-следственных связей в зашумленных временных рядах.

Мы показали, что отклик на 11-летний солнечный цикл не является пространственно однородным. В высоких широтах (на примере станции Восток и широтных поясов 50°–80°) вариации HFD находятся в фазе с TSI и демонстрируют амплитуду отклика 0.5–1.0 °C на 0.1% изменения инсоляции, что количественно согласуется с теоретическими оценками эффекта полярного усиления. В низких широтах этот сигнал маскируется внутренним шумом климатической системы, тем не менее, расчет условных дисперсий демонстрирует статистически значимую направленную причинная связь от TSI к крупномасштабным океаническим индексам (Эль-Ниньо/NINO 3.4 и Тихоокеанская декадная осцилляция).

Анализ максимальных показателей Ляпунова для реконструкций TSI и климатических индексов показал, что система «Солнце–Земля» не противоречит концепции детерминированного хаоса. Горизонт предсказуемости для 11-летних циклов ограничен 8-12 годами, а для вековых вариаций – 35-40 годами. Полученные результаты указывают на необходимость перехода от детерминистских к вероятностным сценариям долгосрочного климатического прогноза и использования физически согласованных метрик (тепловые потоки) для выделения слабого солнечного сигнала.

Воспроизведение изменений климата моделью Земной системы ARTS-ESM в рамках программы сравнения климатических моделей CMIP7

Володин Е.М., Брагина В.В., Черненков А.Ю., Тарасевич М.А., Кострыкин С.В.
Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
volodinev@gmail.com

Ключевые слова: *модель, климат, изменение, сценарий, температуры, параметризация*

Рассматривается воспроизведение изменений климата в 1850-2021гг., с помощью модели климатической системы ARTS-ESM, а также вероятные будущие изменения климата до 2100 г. при различных сценариях. Дается краткий обзор проведенных с моделью численных экспериментов в рамках проекта CMIP7. Показаны основные отличия результатов моделирования с помощью текущей версии модели от результатов, полученных по предыдущим версиям, и кратко объяснены причины отличий. Проводится сравнение результатов моделирования с данными ансамбля моделей CMIP6.

Сезонный режим области мезопаузы над Якутией: температурные характеристики и ветровые наблюдения

Гаврильева Г.А., Аммосов П.П., Николаев Е.М.
Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
low.coder@mail.ru

Ключевые слова: *мезопауза, сезонная изменчивость температуры, термическое лето, зональный ветер, Aura MLS, TIMED/TIDI, Якутия*

Исследуется сезонный режим области мезопаузы в районах Маймаги, Тикси и Нерюнгри за 2017–2018 гг. Цель работы — определить характеристики термического лета и проверить возможность их сопоставления с сезонной сменой зонального ветра.
Обработаны данные Aura MLS версии 5 на уровнях давления 0,00464 и 0,00215 гПа. Выполнены контроль качества и отбор ночных профилей при зенитном угле Солнца более 99°. Расчёты NRLMSIS 2.0 проведены с историческими индексами солнечной и геомагнитной активности для времени, координат и давления измерений MLS.
Для Маймаги привлечена оцифрованная 30-суточная кривая вращательной температуры OH(3–1) из работы Сивцевой и др. (2021). На общих участках сглаженных кривых среднеквадратическое расхождение с OH составило 6,14 и 5,39 K для MLS на уровне 0,00215 гПа и 7,93 и 9,88 K для NRLMSIS 2.0 в 2017 и 2018 гг. соответственно. Это описательные показатели; OH-кривая 2018 г. заканчивается 10 мая.
Границы термического лета определены по адаптированному критерию Офферманна: пересечениям трёхгармонической аппроксимации с её постоянной составляющей вокруг холодного минимума. В Нерюнгри при максимальном пробеле 28 суток оценки прошли внутренние проверки, а продолжительность лета составила 148,5–155,2 суток. Переход к двум гармоникам смещал границы не более чем на 2,2 суток. В Маймаге и Тикси пробелы достигали 102 и 152–153 суток; оценки не прошли контроль сезонного покрытия.
Для независимой ветровой проверки начата обработка данных TIMED/TIDI. Дальнейший анализ предусматривает контроль покрытия по высоте и местному солнечному времени, учёт суточной и полусуточной изменчивости и сопоставление термических границ с сезонной сменой зонального ветра. Такая проверка позволит установить, насколько температурные переходы согласуются с изменением ветрового режима.

Исследование отклика тропосферы и стратосферы на события ЭНЮК

Гекова А.В., Латышева И.В., Лощенко К.А., Вологжина С.Ж., Бреусова Ю.А.
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
gekova00@bk.ru

Ключевые слова: *стратосфера, климат, ЭНЮК, циклогенез, геопотенциал, полярный вихрь*

Режим стратосферного ветра в тропической и экваториальной зоне Тихого океана может быть связан с динамикой климатического индекса Южное колебание (ENSO или ЭНЮК), который представляет собой цикличные изменения приземного атмосферного давления или температуры поверхности океана в экваториальной зоне Тихого океана. По данным [1] межгодовая изменчивость ветра в экваториальной стратосфере коррелирует с ENSO, а по данным [2] фаза Эль-Ниньо приводит к возникновению мощного потока тепла в стратосферу, в результате чего возможно ослабление зонального переноса, как следствие, усиление меридиональных потоков, что может привести к продолжительным климатическим аномалиям.

Для определения возможного влияния событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья на тропосферную циркуляцию и экваториальный ветер в стратосфере в работе по данным реанализов были построены карты аномалий ветра, геопотенциальных высот, приземного давления и приземной температуры воздуха для уровней стратосферы, тропопаузы, средней тропосферы и поверхности Земли. Были выбраны самые сильные события Эль-Ниньо последних десятилетий (1982-1983, 1997-1998 и 2015-2016 гг.) и Ла-Нинья (1999-2000, 2010-2012 и 2020-2022 гг.).

Установлено, что при сильных событиях Эль-Ниньо отмечается углубление циркумполярного вихря в стратосфере и тропосфере, ослабление пассатной циркуляции, усиление полярного циклогенеза и антициклогенеза над большей площадью Тихого океана у поверхности Земли. При событиях Ла-Нинья происходит ослабление ветра в экваториальной стратосфере и усиливается высотный циклогенез в стратосфере над значительной частью Тихого океана, у поверхности Земли преобладает антициклогенез, за исключением крайних северных районов Тихого океана.

Литература

1. Коленникова М.А. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и Реанализа / М.А. Коленникова, П.Н. Варгин, Д.Ю. Гущина // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 6. – С. 5–23.
2. Яковлев А.Р. Влияние Эль-Ниньо - Южной осцилляции на арктическую стратосферу /А.Р. Яковлев, С.П. Смышляев // В сборнике: Международный симпозиум "Атмосферная радиация и динамика" (МСАРД– 2021). Сборник трудов Международного симпозиума. Санкт-Петербург. – 2021. – С. 179-183.

Пять десятилетий развития математической экологии: наземные экосистемы, популяционная динамика, термический комфорт

Гинзбург А.С., Логофет Д.О., Александров Г.А., Белова И.Н., Голубятников Л.Л., Завалишин Н.Н., Казанцев В.С., Докукин С.А., Помелова М.А., Александров Г.Г., Кривенок Л.А., Фалалеева В.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gin@ifaran.ru

Ключевые слова: *математическая экология, биологический круговорот, наземные экосистемы, популяционная динамика, «ядерная зима», климат мегаполиса, термический комфорт*

Развитию математической экологии в СССР способствовала созданная в Вычислительном центре АН СССР по инициативе академика Н.Н. Моисеева в 1976 году Лаборатория математической экологии (ЛМЭ) под руководством Ю.М. Свирежева – ученика Н.В. Тимофеева-Ресовского. В 90-е годы XX века по решению академиков А.А. Дородницына и Г.С. Голицына лаборатория вошла в состав Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

В ЛМЭ получены общие уравнения динамики эволюционирующих популяций, разработана теория устойчивости биологических сообществ, создан новый тип марковских моделей для описания и прогноза изменений растительного покрова под воздействием изменений климата, разработаны математические модели биологического круговорота. В 80-е годы XX века сотрудники ЛМЭ ВЦ АН СССР вместе с сотрудниками Института физики атмосферы выполнили пионерские работы по оценке возможных долговременных климатических и экологических последствий крупномасштабного ядерного конфликта – «ядерной зимы».

В первую четверть XXI века наряду с традиционными исследованиями взаимодействия наземных экосистем и климатических процессов сотрудниками ЛМЭ ИФА РАН разработаны статистические модели газового и аэрозольного загрязнения городского воздуха, выполнен анализ роли антропогенных потоков тепла в формировании городского острова тепла, изучено воздействие волн тепла на устойчивость городских энергосистем, получены критерии превентивной адаптации к изменению климата, рассчитаны тренды периода термического комфорта в условиях глобального потепления.

В докладе описаны основные научные достижения сотрудников Лаборатории математической экологии за пять десятилетий ее существования.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 125021001827-3.

Характерные крупномасштабные условия смерчегенеза в регионах Северной Евразии за период 2012-2026 гг. по данным реанализа ERA5

Гостев К.С.[1,2], Чернокульский А.В.[1,3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
k.gostev@ifaran.ru

Ключевые слова: *реанализ, климатология, смерчи, торнадо*

Смерчи регулярно формируются в Северной Евразии [1], однако условия смерчегенеза до сих пор изучены не в полной мере. В данной работе представлена оценка термодинамических и динамических условий формирования всех типов сухопутных смерчей (а также некоторых мезоциклонных водяных смерчей) за период с 2012 по 2026 гг. на основе данных реанализа ERA5.

Выявлены ключевые мезомасштабные закономерности, определяющие формирование смерчей различного генезиса, интенсивности и продолжительности. Проведен сравнительный анализ условий смерчегенеза на территории Северной Евразии, США и Центральной Европы с привлечением аэрологических диаграмм и годографов ветра. Результаты показали высокую степень сходства годографов смерчей в Северной Евразии с годографами в Европе, однако в то же время выявлены специфические черты, сближающие исследуемую выборку с условиями США (и нетипичные для Центральной Европы).

С помощью метода кластерного анализа k-means изучена пространственно-временная структура атмосферы во время смерчегенеза. В ходе него выделились три основных кластера, характеризующих условия, благоприятные для формирования смерчей. Установлено, что на исследуемой территории преобладают ситуации с интенсивным сдвигом ветра при слабой неустойчивости. Степень пространственной компактности и характер распределения смерчей в условиях сильного сдвига и слабого CAPE статистически значимо отличаются от других кластеров, причём наибольшие различия проявляются на границе субсиноптического и мезо-бета масштабов. Выявлена связь вспышек смерчей с данным режимом. Также отмечен фактор сезонности: в теплое время года преобладает максимальная энергия неустойчивости и более слабые сдвиги; в зимнее время динамический фактор доминирует над термодинамическим.

Полученные результаты могут использоваться для улучшения прогноза смерчей, в том числе долгосрочных оценок с помощью климатических моделей, что особенно актуально в свете общей интенсификации опасных атмосферных конвективных явлений [2].

Литература

1. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Куне Т. Смерчи в российских регионах, Метеорология и гидрология, 2021, №2,17–34.
2. 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, №5,27–41.

Отклик циркуляции внетропической тропосферы и стратосферы на Эль-Ниньо в условиях меняющегося климата

Гущина Д.Ю.[1], Гвоздева А.В.[1,2]
[1]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
dasha155@mail.ru

Ключевые слова: *Эль-Ниньо, удаленный отклик, циркуляция тропосферы и стратосферы, изменения климата, CMIP6*

Исследование отклика атмосферной циркуляции на Эль-Ниньо – ключевое направление современной науки, так как достигнутые успехи в прогнозе Эль-Ниньо дают ключ к долгосрочному прогнозированию аномалий погоды. Авторами ранее было показано, что Эль-Ниньо модифицирует крупномасштабные моды атмосферной циркуляции как в тропосфере, так и в стратосфере, вызывая погодные аномалии в высоких широтах. В будущем прогнозируется изменение как характеристик самого Эль-Ниньо, так и удаленного отклика. Учитывая максимальные темпы потепления, наблюдающиеся в полярных широтах, анализ наложения тропического сигнала на тренды глобального потепления становится особенно актуальным.

На базе данных реанализов и моделей CMIP6 проведена оценка качества воспроизведения крупномасштабных мод атмосферной циркуляции и удаленного отклика на Эль-Ниньо в современном климате, а также изменений интенсивности и пространственной структуры отклика в будущем.

Показано, что в будущем климате происходит существенная интенсификация и модификация термодинамического отклика тропосферы и стратосферы на Эль-Ниньо, при этом характер и интенсивность изменений зависят от уровня радиационного форсинга и сезона года. Наиболее принципиальные изменения выявлены в Южном полушарии зимой: при центральном типе Эль-Ниньо в тропосфере происходит смена знака отклика (вместо ослабления — усиление полярного вихря), при этом различия между откликами на два типа Эль-Ниньо существенно уменьшаются. В Северном полушарии различия в будущем климате сохранятся.

На основании оценок термического отклика выявлено, что Эль-Ниньо вносит существенный вклад в формирование региональной неоднородности арктического усиления в условиях будущего климата: события Восточно-Тихоокеанского Эль-Ниньо способствуют смягчению арктического усиления в полярных широтах Северной Америки и его усилению в Северной Евразии, тогда как центральное Эль-Ниньо вызывает его дополнительную интенсификацию преимущественно в арктическом бассейне Канады.

Динамические предвестники внезапных стратосферных потеплений с расщеплением и смещением стратосферного полярного вихря

Диденко К.А.[1,2], Ермакова Т.С.[3,4], Коваль А.В.[3], Маурчев Е.А.[2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[4]*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия*
didenko.xeniya@yandex.ru

Ключевые слова: *внезапное стратосферное потепление, стратосферный полярный вихрь, планетарные волны, потоки волновой активности, потенциальная завихренность*

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) являются проявлением динамической изменчивости зимней стратосферы и сопровождаются перестройкой стратосферного полярного вихря (СПВ). Цель работы — выявление динамических предвестников ВСП с расщеплением и смещением СПВ. Исследование выполнено на основе данных реанализа MERRA-2 за зимние сезоны с 1980 г. Для анализа отобраны пять ВСП с расщеплением и пять со смещением. Для каждого типа событий построены композиты относительно даты начала ВСП и исследованы вертикальный поток волновой активности Пламба, структура атмосферных волноводов, показатель преломления планетарных волн и меридиональный градиент потенциальной завихренности. Показано, что перед ВСП разных типов существуют существенные различия в распространении планетарных волн (ПВ). При расщеплении СПВ усиление восходящего потока волновой активности начинается примерно за две недели до события, постепенно охватывает значительную часть стратосферы и достигает максимума непосредственно перед ВСП. При ВСП со смещением усиление волновой активности более локализовано, а после события она ослабевает значительно быстрее. Различия связаны с неодинаковой структурой стратосферных волноводов. Перед ВСП с расщеплением наблюдаются более высокие скорости западного зонального ветра в средних широтах и увеличение концентрации изолиний меридионального градиента потенциальной завихренности. При смещении СПВ волноводы остаются более протяженными, обеспечивая благоприятные условия для распространения ПВ1 и ПВ2 в верхние слои атмосферы. Таким образом, для ВСП с расщеплением характерны более раннее накопление и последующая концентрация волновой активности, тогда как при смещении сохраняются благоприятные условия для вертикального распространения волн. Результаты могут быть использованы для увеличения горизонта прогнозирования ВСП и определения их морфологического типа.
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда РНФ, грант № 23-17-00273, https://rscf.ru/project/23-17-00273/.

WRF моделирование метеопроцессов в московской агломерации в сухой летний период с использованием различных городских параметризаций

Докукин С.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
dokukinsa@ifaran.ru

Ключевые слова: *WRF, urban, SLUCM, BEP, BEM, WUDAPT*

Для описания мезоклиматических процессов широко используется мезомасштабная модель WRF [1]. Городские параметризации позволяют учитывать влияние урбанизированной территории. Без специализированных городских параметризаций (No-Urban) урбанизированная территория представлена только особым типом ячейки с соответствующими значениями параметров в модели подстилающей поверхности. В однослойной модели Single Layer Urban Canopy Model (SLUCM) учитывается только геометрия улиц. В многослойной модели Building Effect Parametrization (BEP) добавляются эффекты, связанные с различной высотой зданий. Модель BEP можно рассматривать
совместно с Building Energy Model (BEM), детальнее описывающей кондиционирование и антропогенные потоки. Для улучшения данных об урбанизированных территориях в дополнение к стандартной схеме с 21 локальной климатической зоной (LCZ) можно использовать карты World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), из которых WRF извлекает данные о сплошном искусственном покрытии и 10 LCZ, связанных с типами застройки.

В работе производится сравнение результатов моделирования с помощью WRF с городскими параметризациями No-Urban, SLUCM, BEP и BEP+BEM с экспериментальными измерениями. Приземные температура, скорость ветра и относительная влажность сравниваются с показаниями метеостанций, а высота дневного и ночного пограничного слоя сравнивается со значениями, полученными при обработке данных метеозонда, запускаемого в Долгопрудном. При долгосрочном погодном моделировании целесообразно рассматривать два сезона [2]. Поэтому для исследования на основе ежегодных докладов Росгидромета были выбраны два летних сезона с минимальным количеством погодно-климатических аномалий на Европейской территории России. Также в работе производится сравнение результатов моделирования с оригинальным распределением LCZ и моделирования с использованием карт WUDAPT.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 125021001827-3.

Литература

1. Skamarock, W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 4 // NCAR Tech. Note (2019) 145, https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97.
2. Докукин С. А., Гинзбург А.С., Тихоненко Н.Д. Влияние теплового загрязнения атмосферы на приземную температуру и скорость приземного ветра зимой в московской агломерации // Метеорология и Гидрология (2026/2027), принято к публикации.

Оценка изменений режима осадков над Европейской территорией России в XXI веке по расчётам климатической модели ИВМ РАН

Дьякова Е.А.[1,2], Акперов М.Г.[1,2], Бабанов Б.А.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
diakova.ea@phystech.edu

Ключевые слова: *климатические модели, коррекция систематической ошибки, квантильное отображение, режим осадков, Европейская территория России, сценарии изменения климата*

Выполнен анализ изменений режима зимних и летних осадков над Европейской территорией России (ЕТР) в XXI веке по результатам расчётов глобальной климатической модели ИВМ РАН (INM-CM5-0) для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 за период 2071-2100 относительно исторического сценария 1985-2014. Для коррекции систематических ошибок модельных данных использовались методы квантильного отображения (Quantile Mapping) (Themeßl et al., 2012; Cannon et al., 2015). Эффективность оценивалась путём сопоставления скорректированных модельных осадков с данными реанализа ERA5 с использованием статистических характеристик: среднего смещения, среднеквадратической ошибки, отношения стандартных отклонений, коэффициента корреляции Пирсона, центрированной среднеквадратической ошибки, а также процентилей распределения. По результатам сравнительного анализа выбран метод Empirical Quantile Delta Mapping (QDM), обеспечивающий наилучшее согласие скорректированных модельных данных с реанализом ERA5. Результаты показывают выраженные сезонные и пространственные различия изменений осадков. Зимой все сценарии предполагают рост осадков, наиболее заметный на севере ЕТР (побережье Баренцева моря, Кольский полуостров, север Коми, Полярный Урал) и над Баренцевым морем. Средний рост: 0,2 мм/сут при SSP1-2.6 и SSP2-4.5, 0,3 мм/сут при SSP5-8.5; с усилением сценария растут и величина, и площадь изменений. Летом распределение неоднородно: при SSP1-2.6 — небольшой рост в центральной и южной частях ЕТР; при SSP2-4.5 усиливается контраст — рост на северо-востоке, уменьшение в Центральной России, Среднем Поволжье и южном Предуралье; при SSP5-8.5 рост охватывает северо-восток ЕТР, а в центральных и южных районах, включая Поволжье, Предуралье и Северный Кавказ, осадки сокращаются местами на 0,5–1,0 мм/сут, но не везде статистически значимо.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (FMWR-2026-0004).

Литература

1. Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. // Climatic Change, 2012, 112(2), 449–468.
2. Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? // Journal of Climate, 2015, 28(17), 6938-6959.

Развитие инструментов управления климатическими рисками в транспортной области

Дубчак И.А.[1], Чернокульский А.В.[2], Иньшаков А.В.[1]
[1]*НИИТ РУТ (МИИТ)*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
a.chernokulsky@ifaran.ru

Ключевые слова: *гидрометеорологические явления, деградация многолетнемерзлых грунтов, изменения климата, климатические риски, утрата функциональности, деформация инфраструктуры, рост аварийности, нарушение цепочек поставок, увеличение затрат на ремонт и обслуживание, мониторинг климатических рисков, адаптация к изменению климата*

Изменения климата определяют рост потерь от стихийных бедствий, которые за 2025 год составили 202 млрд долл. в год, а фактические затраты с учётом каскадных эффектов по ряду оценок могут превышать 2,3 трлн долл. При этом свыше 96% средств уходит на восстановление и лишь 4% — на предупреждение рисков. Необходим переход от реактивной модели к превентивной.

За 2013–2024 гг. ущерб от природных ЧС в России также существенно, можно отметить такие события, как паводок на Амуре (2013, 87,9 млрд руб.), наводнение в Оренбургской области (2024, свыше 40 млрд руб.), катастрофы в Краснодарском крае (2012, 20 млрд руб.; 2002, свыше 17 млрд руб.). При этом одним из главных реципиентов риска является транспортный сектор, включающий сеть свыше 2,8 млн км, 204 тыс. предприятий, 6,4 млн занятых, вклад 6–6,5% ВВП. Рост опасных погодных явлений формирует риски безопасности движения, эксплуатации инфраструктуры и здоровья персонала.

На данный момент в Российском университете транспорта в партнёрстве с институтами Российской академии наук, учреждениями Росгидромета, вузами Китая, Малайзии, Беларуси, Армении ведутся исследования влияния изменений климата на транспортную отрасль, запатентован ряд методик в области оценки климатических рисков. Инициировано создание ситуационно-аналитического центра «РУТ-Климат», деятельность которого направлена на формирование системы мониторинга климатических рисков для транспортной отрасли, получение уточненных оценок уязвимости, создание геоинформационной системы (ГИС «РУТ-Климат») на основе различных данных, научно-методическое сопровождение решений Минтранса России в области адаптации к изменениям климата.

В докладе будут представлены первые результаты работы центра «РУТ-Климат» в данной области.

Эволюция климата последних 26 тыс. лет в модели Земной системы ИФА РАН

Елисеев А.В.[1,2], Плосков А.Н.[2], Семенов В.А.[2]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
eliseev.alexey.v@gmail.com

Ключевые слова: *палеоклимат, ледниковые щиты, последний ледниковый максимум, поздний дриас, средний голоцен, МЗС ИФА РАН*

С моделью Земной системы Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (МЗС ИФА РАН) выполнена серия численных экспериментов по воспроизведению глобального климата последних 26 тыс. лет в зависимости от состояния ледовых щитов Северного полушария (по четырём различным палеореконструкциям) и характеристик чувствительности модели к внешнему воздействию (с использованием 3 версий модели с разной равновесной чувствительностью климата к удвоению концентрации CO_2. в атмосфере — ECS). В расчётах также учитывались изменение параметров орбиты Земли, солнечной постоянной, концентраций CO_2, CH_4 и N_2O в атмосфере и площадь распространения сельскохозяйственных угодий. Модель количественно воспроизводит похолодание климата в период последнего ледникового максимума (ПМЛ), 23-19 тыс. л.н. в версиях модели с ECS в интервале от 3,6 до 4,5°C. Недостаточное похолодание в ПЛМ в тропиках над океаном при этом можно связать с недостаточно детальным модулем океана, его грубым пространственным разрешением или с неучётом изостазии тектонических плит в проведённых расчётах. Модель также в целом (вне тропиков — в том числе и на количественном уровне) воспроизводит снижение количества осадков в ПЛМ. Учёт эволюции ледовых щитов улучшил воспроизведение моделью климатических характеристик первой половины голоцена (~10-5 тыс. л.н.) по сравнению с прошлыми экспериментами с моделью. Следует отметить, что МЗС ИФА РАН, как и другие современные модели (как упрощённые, так и модели общей циркуляции), не воспроизводит температурный оптимум среднего голоцена 6,5-5,5 тыс. л.н.

Радиолокационные характеристики градовых облаков и эффективность их обнаружения на ДМРЛ-С

Ерошкина Н.А.[1,2], Бугримов А.В.[2,4], Коренев Д.П.[1,3], Павлюков Ю.Б.[1], Серебрянник Н.И.[1], Чернокульский А.В.[2,4]

[1]*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия*

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

[3]*Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия*

[4]*Институт географии РАН, Москва, Россия*

nadezhda_eroshkina@mail.ru

Ключевые слова: *метеорологический радиолокатор, ДМРЛ-С, град, оправдываемость, наземные наблюдения, конвективные опасные явления погоды*

Рассматриваются вопросы оценки эффективности идентификации очагов града по данным сети ДМРЛ-С и изучения радиолокационных (р/л) характеристик градовых облаков на ЕТР.

Оценивается качество идентификации на 46 ДМРЛ-С 887 случаев града по данным ГМС (телеграмм в коде WAREP) за 2023–2025 гг. [1]: средняя оправдываемость идентификации составила 70%, града диаметром 5-9 мм – 59%, 10-14 мм – 84%, 15-19 мм – 93%, ≥20 мм – 100%. Рассмотрена зависимость числа случаев и успешности идентификации града на ДМРЛ от сезона, времени суток, приземной температуры. Значимой зависимости качества идентификации от удалённости очага града от радиолокатора не выявлено, эффект ослабления радиолокационного излучения в 5-см диапазоне в большинстве случаев не привёл к практическим ошибкам благодаря анализу вертикальной структуры облака.

Исследованы также р/л характеристики 221 градового события [2], сформированного по 394 сообщениям за тёплый период 2024 года в центральной части ЕТР. Каждое событие связано с конкретным градовым облаком, перемещение которого было восстановлено по данным наблюдений сети ДМРЛ-С. Проведён анализ диапазонов изменения основных р/л характеристик и их динамика в течение времени жизни градового очага. Для событий очень крупного града проанализирована динамика вертикального профиля р/л отражаемости в ядре конвективного очага в течение всего периода его существования, выделены интервалы резкого усиления очага в начале жизни (за 20-30 минут до первого сообщения о выпадении града) и специфические черты процесса диссипации очага, имеющие периодичность 40-60 минут.

Проведённые работы позволяют охарактеризовать как качество идентификации града на сети ДМРЛ-С, так и вертикальную структуру и эволюцию очагов града на Европейской территории России.

Литература

1. Павлюков Ю. Б. и др. Оценка эффективности идентификации града на метеорологических радиолокаторах ДМРЛ-С // Метеорология и гидрология. — 2026. — № 9. — С. 95–104. — DOI 10.52002/0130-2906-2026-9-95-104.

2. Ерошкина Н.А. и др. Характеристики градовых облаков на европейской территории России в 2024 г. по радиолокационным, грозопеленгационным и спутниковым данным // Метеорология и гидрология, 2026, №11, в печати

Анализ долгопериодных изменений высоты нижней границы конвективной облачности в 1976 – 2025 гг.

Ерошкина Н.А.[1,2], Чернокульский А.В.[2,3]
[1]*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
nadezhda_eroshkina@mail.ru

Ключевые слова: *высота нижней границы облачности, кучево-дождевая облачность, долгопериодные изменения*

Современное изменение климата проявляется не только в росте приземной температуры, но и в перестройке вертикальной структуры атмосферы. Увеличение влагосодержания тропосферы, подъём высоты тропопаузы, интенсификация конвекции и рост повторяемости и интенсивности опасных конвективных явлений [1]. Это делает исследование вертикальной структуры конвективной облачности одной из актуальных задач современной климатологии.

С конвективной облачностью связаны основные механизмы вертикального переноса тепла, влаги и импульса, формирование осадков, опасных явлений, молний. Высота верхней границы конвективной облачности меняется в широком диапазоне и хорошо определяется по спутниковым данным [1]. Высота нижней границы облачности (ВНГО) менее изучена с точки зрения климатических изменений, исследования носят региональный характер [2].

В данной работе проанализирован архив наблюдений 132 станций за 1976–2025 гг. Выполнена отбраковка данных 22 станций с неоднородными рядами, что позволило сформировать репрезентативную выборку. Оценки изменения ВНГО получены отдельно для конвективной облачности с учётом наблюдений за характером осадков. Анализ проведён как для всей территории страны, так и для регионов, в среднем за год и для каждого отдельного месяца.

Среднее для России снижение ВНГО составило более 15 м / 10 лет, для случаев без ливневых осадков тренд более выражен – 18 м / 10 лет (против 8.5 м / 10 лет для случаев с ливнями). Выявлены разнонаправленные тенденции изменения ВНГО в разных регионах. На юге европейской части России выявлено общее увеличение ВНГО, особенно выраженное в зимние месяцы (более 20 м / 10 лет). На юге Сибири и Дальнего Востока ВНГО уменьшается более чем на 20 м / 10 лет. Полученные результаты указывают на пространственную неоднородность изменения ВНГО, что может указывать на отклик облачности на изменение циркуляционных условий и изменение параметров приземного слоя.

Литература

1. Чернокульский А. В. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным //Метеорология и гидрология. – 2022. – №. 5. – С. 27-41.
2. Пустовалов К. Н.и др. Изменчивость высоты нижней границы облачности над территорией Западной Сибири по данным лазерного зондирования за период 2010–2021 гг //Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36. – №. 9. – С. 733.

Особенности атмосферной циркуляции, связанные с волнами тепла на арх. Шпицберген в холодный период года

Ильющенкова И.А.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
ilyushenkova@aari.ru

Ключевые слова: *архипелаг Шпицберген, атмосфера, западная Арктика, потепление климата, синоптические условия, блокирующие антициклоны*

В работе представлены результаты исследования синоптических особенностей при формировании зимних волн тепла в районе архипелага Шпицберген за период с 1932 по 2025 год. Волна тепла определялась как период продолжительностью не менее трёх последовательных дней, в течение которых максимальная суточная температура превышала 90-й перцентиль. Пороговые значения рассчитывались за климатический период 1991–2020 гг. с использованием 31-дневного скользящего окна. Для оценки интенсивности событий использовалась суммарная магнитуда, учитывающая как величину температурной аномалии, так и продолжительность волны тепла [1].

За исследуемый период выявлено 57 эпизодов превышения 90-го перцентиля, из которых 24 имели суммарную магнитуду не менее 1,5, данные 24 эпизодов в дальнейшем использованы для анализа. При этом наиболее значимые по интенсивности и продолжительности события наблюдались как в 1930-е годы, так и в последние десятилетия. Наиболее интенсивная и продолжительная волна тепла наблюдалась 7–21 декабря 1938 г.: продолжительность составила 15 дней, суммарная магнитуда составила 16,1 и относится к экстремальному значению. Сильные волны тепла отмечены в январе 1937 г. (5,5) и в декабре 2015 – январе 2016 гг. (9,0). После 1990 г. отмечено наибольшее число значимых эпизодов (11 случаев), при этом наиболее интенсивные события произошли в 2012, 2015, 2017 и 2022 гг.

Анализ атмосферной циркуляции показал преобладание восточной формы циркуляции и развитие высотного гребня над Норвежским и Баренцевым морями. Для выявления блокирующих процессов использовались аномалии вертикально осреднённого потенциального вихря на уровне изобарических поверхностей 500–150 гПа [2]. Из 24 эпизодов, для которых был возможен анализ, признаки блокирующей циркуляции выявлены в 19 случаях, при этом частота блокирующих процессов в зимний период выше, чем в летний период [3]. Наиболее высокая повторяемость центров блокирования отмечена в районе северной части Баренцева моря.

Литература

1. Russo S. et al. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. Environmental Research Letters, 2015, vol. 10, no. 12, pp. 124003.
2. Schwierz C. et al. Perspicacious indicators of atmospheric blocking. Geophysical research letters, 2004, vol. 3, no. 6.
3. Ильющенкова И.А. Особенности атмосферной циркуляции, связанные с летними волнами над архипелагом Шпицберген. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2026. № 2 (400). С. 38-50.

Климатические условия в Москве и в городах сравнения в настоящем, прошлом и ближайшем будущем как результат изменения турбулентности атмосферы: основные факторы влияния, теория и действительность

Кадышевич Е.А.[1], Островский В.Е.[2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, Москва, Россия*
ostrovskii.victor@mail.ru

Ключевые слова: *турбулентность атмосферы, потепление климата, приземного воздуха температура, протуберансная активность Солнца, ФФО-ХФО Теория, солнечные протуберанцы*

Климатические условия в любом сколько-нибудь обширном регионе Земного Шара зависят от географических признаков, неизменных во времени, таких как координаты и рельеф региона, и от географических признаков, изменяющихся во времени, таких как природные климатоопределяющие явления, источниками которых могут быть Солнце и земные недра, и антропогенные климатоопределяющие явления, источником которых может быть хозяйственная деятельность людей, например, добыча минералов, химические комбинаты или доменные печи.

Изменение климатических условий в основном определяется и инициируется изменением турбулентности атмосферы. Главным интегральным параметром, доступным измерениям и способным количественно характеризовать уровень турбулентности атмосферы над каким-либо регионом Земного Шара, является температура и её изменения на различной высоте от земли. Более точно понятие о турбулентности атмосферы может быть получено на основе формулы Монина–Обухова.

Температура приземного воздуха является одним из главных факторов, характеризующих климатические условия в данном регионе в период измерений, а температура на разных высотах над контролируемым регионом и на разных расстояниях от данного региона вдоль параллели и вдоль меридиана, характеризующих данный регион, является одним из основных параметров для предсказания ближайших будущих изменений погоды в данном регионе.

В докладе будут представлены результаты продолженного нами 275-летнего мониторинга температуры приземного воздуха в Москве и в городах, лежащих вблизи Московской параллели и к югу от Москвы [1], а также имеющихся данных о протуберансной активности Солнца и о мощности извержений стратовулканов.

Обсуждаются проблемы потепления, возможности будущего похолодания и причины изменений климата на основе полученных данных, литературных источников и развитой нами в течение более 20 лет ФФО-ХФО Теории Формирования и Трансформации Солнечной Системы [2, 3].

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФА РАН №125020501413-6.

Литература

1. Кадышевич Е., Островский В. На Солнце или на Земле: где находятся основные факторы влияния на текущее потепление? // 21-я конф. "Физика плазмы в солнечной системе", ИКИ РАН, Москва, 2026.
2. Островский В., Кадышевич Е. Массовые вымирания видов // Биологическое разнообразие. Ереван, ООО «ТАСК», 2017. С. 233.
3. Ostrovskii V., Kadyshevich E. Solar Protuberances: Their nature, function, and potential threat in the context of the PFO-CFO Theory // SCON International Conference, Amsterdam, 2019.

Моделирование долгоживущих сильных шквалов в лесной зоне России с помощью модели WRF

Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Богатырев Д.А.
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
and3131@inbox.ru

Ключевые слова: *долгоживущие шквалы, модель WRF, воспроизводимость, пропуски, ложные тревоги*

Долгоживущие сильные шквалы являются одним из самых разрушительных видов конвективных опасных явлений погоды (КОЯП). В настоящей работе на основе ранее созданной выборки случаев (Chernokulsky et al., 2026) проводится исследование их воспроизводимости с помощью региональной модели численного прогноза погоды WRF. Моделирование проводилось в режиме диагноза, а для случая 28.05.2026 г. – в режиме прогноза, с шагом сетки 5 км. В качестве начальных условий использованы данные реанализа CFSR для моделирования в режиме диагноза и прогноз ICON – в режиме прогноза. Расчеты выполнены с заблаговременностью от 6 ч до 48 ч от момента формирования долгоживущего шквала, с шагом 6 ч по заблаговременности. Успешность прогноза анализируется на основе объектно-ориентированного подхода, в рамках которого рассматриваются как пропуски явлений, так и ложные тревоги, и их соотношение. В качестве анализируемых переменных рассматривается скорость порывов ветра, количество осадков и завихренность восходящего потока в слое 2-5 км (Updraft Helicity), которая применяется для выделения мезоциклонов в выходных данных модели. Установлено, что при шаге сетки 5 км модель в применяемой конфигурации способна воспроизводить шквалы, в том числе ураганной силы (33 м/с и более). При этом не наблюдается многократного преобладания пропусков явлений над ложными тревогами, что указывает на отсутствие сильного систематического занижения скорости ветра в порывах. Также установлено, что выделенные по модели мезоциклоны (треки высоких значений UH2-5km свыше 50 $м^2/с^2$) далеко не всегда соответствуют сильным шквалам в выходных данных модели. Предварительно случаи шквалов, которые сформировались при сильном сдвиге ветра, воспроизводятся лучше, чем при умеренном сдвиге ветра.

Литература

1. Chernokulsky A.V., Shikhov A.N., Yarinich Y.I., Davletshin S.G. Long-lived convective windstorms and derechos in the Russian forest zone // Agricultural and Forest Meteorology, 2026, V. 111326, Article 111326. DOI: 10.1016/j.agrformet.2026.111326.

Экспериментальные критерии оценки угроз формирования опасных конвективных явлений для Европейской территории России

Калмыкова О.В.[1,2], Спрыгин А.А.[1,2], Вязилов А.Е.[1], Козлов С.В.[1], Ингель Л.Х.[1,2], Кулижникова Л.К.[1]
[1]*НПО "Тайфун", Обнинск, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
kov@feerc.ru

Ключевые слова: *опасные конвективные явления, интенсивная конвекция, критерии угрозы, сигнатуры, индексы неустойчивости, данные дистанционных наблюдений, численное моделирование*

В условиях современного изменения климата сохраняется тенденция на ежегодное увеличение повторяемости опасных природных явлений, как в нашей стране, так и по всему земному шару. Это обстоятельство обосновывает необходимость проведения исследований, нацеленных на повышение качества прогноза этих явлений, в первую очередь на повышение заблаговременности оповещений об угрозах их возникновения и детализации зон риска во времени и в пространстве.

Среди всех опасных природных явлений в России преобладают явления атмосферного характера, а наибольший ущерб хозяйству страны по оценкам Росгидромета наносят явления, связанные с интенсивной конвекцией, возникающие в теплый период года. Прогноз опасных конвективных явлений (ОКЯ) сопряжен с объективными трудностями, обусловленными их быстротечностью и сложной до конца не изученной динамикой порождающих их процессов. Известно, что наиболее эффективной стратегией прогноза ОКЯ является интеграция данных разнородных источников, включая результаты численного мезомасштабного моделирования и дистанционные наблюдения (спутники, радиолокаторы, грозопеленгаторы).

В работе представлены экспериментальные критерии оценки угроз формирования ОКЯ, разработанные для Европейской территории России. Для краткосрочного прогноза (до 2 суток) предложено использовать новый региональный индекс конвективных штормов, позволяющий выявлять условия, благоприятные для развития интенсивных конвективных процессов на основе пороговой методики. Для наукастинга в режиме реального времени разработан комплексный алгоритм расчета вероятности появления ОКЯ (в ближайший час) по оценке порогов и трендов диагностических данных. Продемонстрированы результаты последовательного применения указанных критериев в сценарии прогноза опасных явлений в сезон 2026 г.

Исследование выполнено в соответствии с Планом научно-исследовательских работ Росгидромета на 2025-2029 гг. (проект № 125102712061-6) при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-00357.

Зависимость режима колебаний уровня Каспийского моря от параметров притока, испарения и стока в залив Кара-Богаз-Гол

Климович Г.П.[1], Мурышев К.Е.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
klimovich.gp20@physics.msu.ru

Ключевые слова: *Каспийское море, колебания уровня моря, мультимодальность, уравнение водного баланса*

Изучение режима колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) имеет высокую значимость для фундаментальной гидрологии, климатологии и прикладных задач прибрежного природопользования. В основе современных представлений о формировании уровня лежит рассмотрение водоема как динамической системы, преобразующей входные сигналы (речной сток, осадки, испарение и др.) в выходной процесс — колебания уровня.
Одним из классических подходов в данной предметной области является динамико-стохастический подход, базирующийся на уравнении водного баланса:

$$dV/dt = Q(t) - E(t) - K(t),$$

где V [км³] – объём воды; Q(t) [км³/год] - суммарное поступление воды в море, E(t) [км³/год] - испарение с поверхности моря; K(t) [км³/год] – сток в залив Кара-Богаз-Гол (КБГ).
В качестве основного инструмента данного исследования выступает модель колебаний уровня проточного водоёма, описанная в работах А.В. Фролова [1, 2]. Она базируется на системе разностных стохастических уравнений и позволяет прогнозировать распределение вероятности уровня водоёма, в зависимости от входных сигналов – притока, испарения и стока в КБГ.
С моделью поставлены численные эксперименты при различных значениях входных параметров и проведен анализ влияния каждого из них на вид распределения вероятности уровня Каспия. Исследованы условия, при которых распределение УКМ оказывается одно-, двух- или трёхмодальным. На основании классического решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова получены аналитические выражения для плотности распределения вероятности УКМ, хорошо согласующиеся с результатами численных экспериментов.

Литература

1. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.
2. Фролов А.В. Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С.120–128.

Наблюдение внутренних гравитационных волн во время внезапного стратосферного потепления по данным камеры всего неба

Колтовской И.И., Ноев Е.Н., Тыщук О.В., Аммосов П.П.
Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия
koltigor@mail.ru

Ключевые слова: *мезосфера, температура верхней атмосферы, внутренние гравитационные волны, внезапное стратосферное потепление, свечение гидроксила*

В работе представлен детальный анализ распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ) во время сильного (мажорного) внезапного стратосферного потепления (ВСП), зафиксированного зимой 2010 года. Исследование направлено на изучение динамики и характера активности ВГВ на двух ключевых стадиях развития атмосферного возмущения: до его начала, а также непосредственно в процессе развития и после потепления. Экспериментальные данные получены методом наземных оптических наблюдений с использованием инфракрасной камеры всего неба, регистрирующей пространственную структуру свечения гидроксила (OH) на высоте около 87 км. Построены азимутальные диаграммы направленности ВГВ с шагом 30° отдельно для двух ключевых периодов возмущения. Установлено, что на этапе до ВСП явно доминировали волны восточного и юго-восточного направлений, переносившие основную часть волновой энергии. В период развития потепления и после его завершения обнаружена инверсия направлений распространения ВГВ. Зарегистрированные волновые события локализовались в западном и юго-западном секторах. На основе сопоставления результатов можно сделать вывод о том, что в мезосфере экспериментально прослеживается полный цикл модуляции ВГВ под влиянием стратосферной перестройки, где фоновый ветер выступает в роли глобального фильтра, определяющего условие передачи волнами импульса окружающей среде.

Применение методов машинного обучения для статистической коррекции численного прогноза погоды оперативной системой COSMO-Ru

Коспанов А.А.[1,2], Ривин Г.С.[1,2], Розинкина И.А.[1,2]
[1]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
kospanov.alen@gmail.com

Ключевые слова: *численный прогноз погоды, машинное обучение, статистическая коррекция*

Рассмотрена коррекция прогнозов температуры воздуха и точки росы на высоте 2 м, а также составляющих ветра на высоте 10 м модели COSMO-Ru6ENA. Сопоставлены методы HistGB и CatBoost, использующие текущие характеристики прогноза, историю ошибок на станциях и сочетание машинного обучения с фильтром Калмана. В качестве базовых методов использованы постоянные и скользящие поправки, а также фильтр Калмана.

Модели обучены на данных за 2024 год с разделением станций на пять групп для пространственной перекрёстной проверки. Предикторы включали метеорологические величины в восьми ближайших узлах сетки, характеристики станции, заблаговременность и календарные признаки. В моделях с учётом истории ошибок использовались только наблюдения, доступные к моменту выпуска прогноза.

Проверка выполнена по наблюдениям SYNOP для 111 выпусков прогнозов за сентябрь 2026 года с заблаговременностью до 72 ч. Наименьшую среднеквадратическую ошибку (RMSE) температуры воздуха и точки росы обеспечил HistGB с учётом предшествующих ошибок. RMSE снизилась соответственно с 2,414 до 1,793 °C и с 2,756 до 2,096 °C, то есть на 25,8 и 23,9 %. Улучшение получено примерно на 94–95 % станций. Для обеих составляющих ветра лучший результат показал CatBoost с учётом истории ошибок: снижение RMSE составило 46,4 и 47,2 %. Интерпретация результатов для ветра требует дополнительной проверки системы координат исходных составляющих.

Полученные результаты показывают преимущество градиентного бустинга перед простыми статистическими поправками на рассмотренной выборке. Учёт предшествующих ошибок особенно полезен для коррекции температуры воздуха и точки росы. Для оценки применимости методов в течение года необходима проверка на данных других сезонов.

Глобальный и региональный отклик климатической системы на выбросы CO_2, заданные по протоколам FLAT10MIP, полученный с помощью модели земной системы ARTS-ESM-L

Кострыкин С.В.[1,2,3], Володин Е.М.[1,2], Черненков А.Ю.[1,2], Тарасевич М.А.[1,4]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[3]*Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия*
[4]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
s_kostr@mail.ru

Ключевые слова: *моделирование земной системы, углеродный цикл, обратимость климата, региональный отклик*

Одним из способов смягчения воздействия глобального потепления климата в будущем является поглощение углекислого газа из атмосферы и его последующее захоронение. Важным вопросом, возникающим при использовании данного метода геоинженерии, является обратимость отклика климатической системы на симметричный по времени источник эмиссии-стока CO_2 в атмосферу. В частности, данный вопрос изучается в рамках проекта CMIP7 FLAT10MIP с помощью модели Земной системы ARTS-ESM-L с интерактивным углеродным циклом. Показано, что в конце эксперимента глобальная температура возвращается к исходному уровню, а глобальные осадки слегка его превышают. В то же время региональный отклик в приземной температуре, по осадкам и запасам углерода в разных экосистемах получается неоднородным. Предлагается возможное физическое объяснение полученных региональных особенностей отклика.

Поиск эффектов 11-летних циклов солнечной активности в исторических данных метеорологического ракетного зондирования Центральной аэрологической обсерватории

Куминов А.А.
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия
airship@mail.mipt.ru

Ключевые слова: *солнечно-атмосферные связи, температура средней атмосферы, 11-летний цикл солнечной активности, ракетное зондирование*

Исследовались временные ряды значений температуры стратомезосферы, полученные средствами ракетного зондирования на станциях «Хейс» (Земля Франца-Иосифа), «Волгоград», «Балхаш», «Тумба» (Индия) и «Молодежная» (Антарктида) в 1969-1995 гг. Измерения проводились термометрами сопротивления в высотном диапазоне 20-80 км, данные представлены с шагом по высоте 1 км.

Фурье-спектры амплитуд указанных рядов наряду с годовыми и полугодовыми гармониками показывают гармоники со значимыми величинами амплитуд в низкочастотной части спектра, которые могут быть совокупно обусловлены трендом, эффектом циклических вариаций солнечной активности и другими вариациями с периодами порядка нескольких лет и больше. Суммирование этих гармоник на каждой высоте и на каждой станции дало временные ряды температуры, очищенные от влияния высокочастотных гармоник, которые рассматриваются в настоящем исследовании как шум.

Все полученные ряды использовались для расчетов кросскорреляционных функций с временным рядом индекса солнечной активности F10.7 (плотности потока солнечного излучения на частоте 2800 МГц) за период 1947-2025 гг., также очищенным от влияния высокочастотных гармоник по описанной выше методике.

В результате для каждой станции i была получена двумерная кросскорреляционная функция $\rho_i(t,h)$, где t – время запаздывания временного ряда температуры от временного ряда F10.7, h – высота уровня измерений.

Представленные в докладе графические материалы наглядно свидетельствуют, что кросскорреляционные функции:

- на каждой станции имеют хорошо выраженную периодичность во времени, близкую к периодичности 11-летнего цикла солнечной активности;
- имеют экстремальные значения, не меньшие по модулю 0.6, а часто близкие к 1;
- на всех высотах демонстрируют запаздывание первых максимумов относительно момента синхронизации коррелируемых рядов на интервалы времени длиной в несколько лет.

Сезонное влияние атмосферной циркуляции на аномалии площади морского льда в морях Российской Арктики в течение 1980–2024 гг.

Латонин М.М.[1,2], Яковлева Д.А.[2], Смирнова Ю.Е.[2], Травкина О.С.[2,3], Шалина Е.В.[2], Гнатюк Н.В.[2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
m.m.latonin@ifaran.ru

Ключевые слова: *морской лёд, Арктика, приповерхностная температура воздуха, сезоны, атмосферная циркуляция, перенос тепла*

Современное потепление климата влияет на сокращение ледяного покрова в Северном Ледовитом океане по-разному в зависимости от сезона. Цель данного исследования — выявить роль атмосферной циркуляции в аномалиях площади морского льда (ПМЛ) в Арктике в течение периода 1980–2024 гг., используя данные спутниковых наблюдений и реанализа ERA5. На основе особенностей атмосферной циркуляции были выделены осень для Восточно-Сибирского моря, зима для Карского моря и весна для Баренцева моря. Средние композитные аномалии климатических параметров над этими морями для экстремальных случаев значений ПМЛ после удаления линейного тренда показали, что при одинаковых закономерностях положительных (отрицательных) аномалий приповерхностной температуры воздуха (ППТВ) и удельной влажности на уровне 1000 гПа для уменьшенной (увеличенной) ПМЛ в разных морях и сезонах, в Карском море наблюдались нехарактерные отрицательные (положительные) аномалии осадков. Сравнение композитных карт аномалий геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа, связанных с экстремальными случаями ПМЛ и меридионального переноса атмосферного тепла в слое 1000–800 гПа в Восточном полушарии на 70°с.ш., показало, что усиленный перенос тепла в Арктику приводит к уменьшению ПМЛ в Баренцевом и Восточно-Сибирском морях весной и осенью, но к увеличению ПМЛ в Карском море зимой, соответственно. Совместный анализ аномалий ветра на уровне 850 гПа и ППТВ показал, что такая особенность зимой связана со структурой «тёплая Арктика–холодная Евразия».
Анализ аномалий в морях Российской Арктики был выполнен за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 25-47-00104. Анализ композитных карт поддержан Государственным заданием Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (FMWR-2025-0011), проект № 1024100700065-0-1.5.11. Анализ причин выявленных зависимостей поддержан Государственным заданием Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (FMWR-2026-0004).

Климат Москвы и его современные изменения

Локощенко М.А., Горбаренко Е.В., Ваховская З.С.
Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
loko@geogr.msu.su

Ключевые слова: *климатическая норма, температура воздуха, облачность, снежный покров, солнечная радиация, кислотность осадков, опасные явления*

По данным наблюдений Метеорологической обсерватории МГУ рассмотрены современные изменения климата Москвы в ходе основных метеорологических элементов, потоков солнечной радиации и кислотности осадков. Начиная с 1954 года, температура и воздуха T, и поверхности возрастала в Москве со средней скоростью 0,04 ºC/год, тогда как на глубине 320 см под естественным покровом потепление почвы происходило медленнее (на 0,02 ℃/год) – вероятно, вследствие теплоизолирующей роли снежного и травяного покровов, а также инерции прогрева грунтовых вод. Рост годового количества осадков в 1950-е и 1960-е гг. замедлился в последние десятилетия. Вследствие увеличения зимних осадков наибольшая высота снежного покрова остаётся пока стабильной (в среднем 46÷48 см), несмотря на более частые оттепели в зимние месяцы. Парциальное давление водяного пара возрастает в среднем на 0,01 гПа/год, тогда как относительная влажность F уменьшается на 0,04 %/год, главным образом – за счёт роста T. Следствием этого служит явление городского «острова сухости» в Москве. В годовом ходе F вследствие потепления весенних месяцев минимум, отмечавшийся прежде в мае, сместился за последние 30 лет на апрель-май. Значительное увеличение облачности и уменьшение суммарной радиации за последние 30 лет отмечены лишь в январе и феврале из-за усиления циклонических процессов; в остальные месяцы и в целом за год статистически значимых изменений нет. Радиационный баланс поверхности устойчиво растёт из-за уменьшения альбедо, особенно зимой, и, как следствие, отражённой радиации. Кислотность осадков в среднем за период 1983÷2024 гг. заметно усилилась лишь в марте и апреле вследствие быстрого потепления в эти месяцы. Приведены также данные метеостанций Москвы и ближнего Подмосковья о многолетних изменениях повторяемости опасных метеорологических явлений (сильной жары и сильного мороза, туманов, метелей, мглы и др.). Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 26-27-20046.

Ансамблевые методы декомпозиции пространственно-распределенных данных для анализа и предсказательного моделирования климатической системы

Лоскутов Е.М.[1], Гаврилов А.С.[2], Селезнев А.Ф.[1], Фейгин А.М.[1]
[1]*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия*
[2]*Университет Валенсии, Валенсия, Испания*
loskutov@ipfran.ru

Ключевые слова: *эмпирическое моделирование, динамика климата, анализ временных рядов, декомпозиция пространственно-распределенных данных, моделирование климата*

В работе исследуется эффективность ансамблевых методов при решении задачи корректного отделения собственной динамики климатической системы от вынужденного отклика на меняющиеся внешние условия (антропогенная эмиссия парниковых газов, солнечная активность и т.д.). Ценность таких методов для предсказательного моделирования заключается в наиболее адекватном разделении нелинейного поведения климатической системы и отклика на форсинг по ансамблям реализаций. Реализованные алгоритмы проецируют мультимодельные ансамбли климатических реализаций в низкоразмерное пространство общего пространственного базиса. Это позволяет эффективно раскладывать многомерные поля данных на временные сигналы вынужденного отклика и пространственно-временные моды собственной изменчивости (в частности, моды явлений Эль-Ниньо и декадной изменчивости). Такое разделение позволяет проводить анализ внутренней структуры моделируемой системы и строить прогностические эмпирические модели, описывающие изолированную динамику мод собственной изменчивости под влиянием внешнего воздействия. Такой подход позволяет задавать внешнее воздействие в виде предопределенного сценария, тогда как оператор эволюции модели оптимизируется исключительно для воспроизведения внутренней изменчивости системы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ соглашение №23-62-10043.

Траекторный анализ процессов переноса в атмосфере Арктики в зимний период 2018 г. и 2021 г. до и после внезапного стратосферного потепления

Лукьянов А.Н.[1], Варгин П.Н.[1,2,3], Юшков В.А.[1]
[1]*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия*
[2]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
lukyanov@caomsk.mipt.ru

Ключевые слова: *траектории воздушных частиц, стратосферный полярный вихрь, внезапное стратосферное потепление, полярное вторжение воздушных масс*

Для анализа динамических процессов в арктическом стратосферном полярном вихре в период возникновения внезапных стратосферных потеплений использовалась траекторная модель TRACAO и данные реанализа M2-SCREAM. Для исследования были выбраны зимы 2018 г. и 2021 г., в течение которых возникали потепления в стратосфере и последующие полярные вторжения в нижней тропосфере. Также для сравнения анализировалась зима 2020 г. с устойчивым полярным вихрем и низкими температурами внутри него. Представлены результаты моделирования тонкой динамической структуры вихря и его границы на различных высотных уровнях в период его разрушения во время потепления, а также вариации ключевых параметров, осреднённых по ансамблю траекторий внутри вихря за период времени, включающий потепление. Также проведены расчёты приземных обратных траекторий из г. Кострома, когда наблюдались минимальные температуры во время полярных вторжений. Показано, что эти низкие температуры были обусловлены не переносом холодного воздуха из полярной области, а термодинамическими процессами, происходящими вдоль траекторий.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Влагосодержание полярной атмосферы по данным радиозондирований и радиометров водяного пара

Макштас А.П.[1], Ильин Г.Н.[2], Большакова И.И.[1], Махотина И.А.[1], Масловский А.С.[1], Быков В.Ю.[2]
[1]*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия*
maksh@aari.ru

Ключевые слова: *влагосодержание атмосферы, радиометр водяного пара, тепловой баланс, пространственно-временная изменчивость*

Изложены основы метода измерения интегрального влагосодержания атмосферы (ИВА) и водозапаса облаков с помощью радиометра водяного пара (РВП) и алгоритм расчета влагосодержания свободной атмосферы по данным радиозондирований. На основе сравнения данных измерений ИВА с помощью РВП и радиозондирований, проведенных в 2022–2026 годах на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» и СП-42 в 2025–2026 годах, показано, что максимальное расхождение между оценками средних за сезоны значений ИВА наблюдается зимой, когда влагосодержание атмосферы минимально. При значимом коэффициенте корреляции от 0.94 до 0.98 по данным РВП наблюдается некоторое завышение величины осредненного ИВА, от 3% летом до 20% зимой. Выявлено практически синхронное изменение влагосодержания в слоях 1000 – 850 и 850 – 500 гПа (коэффициенты корреляции 0.82 – 0.85), что свидетельствует как об адвективном переносе относительно однородных по высоте воздушных масс, так и о достаточно интенсивном перемешивании на границе пограничного слоя атмосферы и нижней тропосферы. Анализ данных РВП, осредненных за каждый час, не выявил суточного хода величины ИВА даже в июле, месяце максимального суточного хода солнечной радиации, что важно при оценке адекватности сопоставления осредненных за сезон данных аэрологической наблюдений, выполняемых на сети станций в 0 ГМТ, но при разной высоте солнца. Данные РВП позволили также оценить связь основных составляющих теплового баланса подстилающей поверхности в районах исследований с ИВА и водозапасом облаков в зимний и летний сезоны.
Методика расчета ИВА по данным радиозондирований использована для оценки пространственно-временной изменчивости влагосодержания атмосферы на станциях, выполнявших аэрологические наблюдения к северу от 60° с.ш. в 2000–2025 г.г.. Максимальные положительные тренды ИВА, достигающие величин 0.16 (кг/м^2)/год в летний период, зарегистрированы на станциях в районе Гренландского моря и побережья Северной Америки. Минимальные – на севере Сибири.

Пузырьковый перенос метана: параметризация и модельные оценки для арктического шельфа

Малахова В.В.
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
malax@sscc.ru

Ключевые слова: *арктический шельф, эмиссия метана, пузырьковый перенос, модель океана*

Донные отложения арктического шельфа — деградирующая субаквальная мерзлота и газовые гидраты — рассматриваются как потенциально значимый источник метана для атмосферы. Однако количественная оценка эмиссии остаётся сложной задачей из-за высокой пространственной неоднородности измерений. Цель работы — повысить точность оценки за счёт учёта в модели океана пузырькового выноса метана.

Расчёты выполнены с моделью океана и морского льда SibCIOM [1], в которой реализован перенос растворённого метана с учётом адвекции, турбулентной диффузии и окисления. Новым элементом является параметризация пузырькового выноса, построенная на модели растворения одиночного всплывающего пузырька [2] и учитывающая распределение пузырьков по размерам, скорость всплытия и степень растворения по мере подъёма. Переход от одиночного пузырька к сипу выполнен осреднением по наблюдаемому спектру размеров с весом, пропорциональным массе метана в пузырьке. Спектрально осреднённая доля метана, достигающая поверхности в диапазоне глубин 5–100 м, описывается экспонентой.

Расчёты для морей арктического шельфа показали, что учёт пузырькового переноса увеличивает эмиссию, осреднённую за 1948–2025 гг., с 0.51 до 1.92 Тг в год, а за 2010–2025 гг. — с 0.73 до 2.30 Тг в год. При этом прямой выброс пузырьками даёт 37 % годового потока, остальные 63 % обеспечивает растворённый метан, поступающий в водную толщу вдоль пути всплытия пузырьков. Доля донного источника, достигающая атмосферы, составляет 8 % без учёта пузырьков и 25 % при их учёте, остальной метан окисляется в толще. Эффект пузырькового переноса наиболее выражен в холодных условиях и ослабевает по мере сокращения ледяного покрова. Предложенная параметризация позволяет разделить вклады диффузионного и пузырькового переноса метана.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (FWNM-2025-0003).

Литература

1. Malakhova V., Golubeva E. Model study of the effects of climate change on the methane emissions on the Arctic Shelves // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 274.
2. McGinnis D. F. et al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. C09007.

Оценка будущих условий летнего термического комфорта на территории Северной Евразии

Маратканова В.С.[1,2], Константинов П.И.[1,2,3]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Shenzhen MSU-BIT University, Шэньчжэнь, Китай*
varvara.mar@yandex.ru

Ключевые слова: *термический комфорт, индексы комфортности, Северная Евразия, CMIP6, PET, UTCI*

В контексте глобальных изменений климата оценка будущих условий термического комфорта человека является важным шагом подготовки стратегий по адаптации. Особенно большое значение это приобретает в летние месяцы, когда регулярная повторяемость условий термического стресса (в том числе в течение волн тепла) приводит к росту смертности. На территории Северной Евразии присутствие районов высокой концентрации населения, а также разнообразие географических условий создает условия для комплексного изучения условий будущего термического комфорта.

Для проведения оценки использовались данные глобальных климатических моделей проекта CMIP6 с разрешением по времени 3 часа. Были выбраны два сценария – SSP 2-4.5 и 5-8.5. HI, HUM и PET использовались в качестве основных индексов термической комфортности.

В результате были выявлены рост повторяемости условий теплового стресса летом к 2100 г. и увеличение территории, где повторяемость превышает 80 %. Повторяемость дней с отсутствием стресса, как теплового, так и холодового, показывает более сложные пространственные паттерны. В северной части исследуемого региона она растет за счёт общей тенденции к росту суточных температурных максимумов, в южной – уменьшается за счёт той же самой тенденции. Знаки абсолютных изменений повторяемости к концу столетия в целом соотносятся со знаками коэффициентов линейного тренда, что указывает на сохранение тенденций изменений условий комфортности климата, наблюдавшихся во второй половине XX в.

Литература

1. Konstantinov P., Varentsov M., Shartova N. North Eurasian thermal comfort indices dataset (NETCID): new gridded database for the biometeorological studies. // Environ. Res. Lett. – 2022. – V. 17. – 085006.
2. Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—Application of the RayMan model. // Int. J. Biometeorol. – 2007. – V. 51. – P.323–334.

Зависимость температурной чувствительности молний и частоты возгораний природных пожаров от типа внешнего воздействия на земную систему по расчётам с моделью ИФА РАН

Михайлов Р.П.[1,2], Елисеев А.В.[1,2,3,4], Гурьянов В.В.[1]
[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[4]*Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия*
mikhailov.r2001@gmail.com

Ключевые слова: *частота молний, природные пожары, МЗС ИФА РАН, внешние воздействия на Земную систему, изменения климата*

С помощью модели Земной системы ИФА РАН проведены численные эксперименты для 1850-2014 гг. с различными типами внешнего воздействия. Все воздействия были заданы в соответствии с условиями численного эксперимента “historical” проекта Coupled Models Intercomparison project, phase 6 (CMIP6). В период 1997-2013 гг. модель в сравнении со спутниковыми данными Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector – LIS/OTD реалистично воспроизводит частоту молний (ЧМ) - как глобальные значения, так и пространственное распределение. При этом модель воспроизводит глобальный коэффициент чувствительности частоты молний к изменению приземной температуры только в ряде регионов при учете воздействия на климат за счёт изменения содержания антропогенных (сульфатных) аэрозолей в тропосфере. МЗС ИФА РАН воспроизводит годовую площадь выгорания из-за природных пожаров (ПП) с ошибками в отдельных регионах. Лучше всего модель воспроизводит чувствительность площади выгорания из-за ПП к изменению частоты молний в экспериментах с учетом антропогенного воздействия с соответствующей эмпирической оценкой.
Благодарности и поддержка. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00015.

К вопросу о полимодальности распределения уровня Каспийского моря

Мурышев К.Е.[1,2]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
kmuryshev@mail.ru

Ключевые слова: *Каспийское море, полимодальное распределение*

Прогноз изменений уровня Каспийского моря (УКМ) является важной практической задачей. Для эффективного прогноза необходимо понимание механизма формирования различных режимов колебаний УКМ, который и является объектом данного исследования. Цель работы состояла в определении условий, при которых распределение УКМ оказывается полимодальным. Исследование осуществлялось с помощью модели колебаний УКМ, разработанной А.В. Фроловым. Ранее было получено, что распределение УКМ может быть одномодальным или бимодальным [1, 2]. В настоящей работе впервые показана возможность трехмодального распределения УКМ. Условием существования бимодального распределения УКМ является немонотонная зависимость объема испарения с поверхности моря от его уровня. Для возникновения трехмодального распределения необходимо также наличие стока в залив Кара-Богаз-Гол (КБГ), резко возрастающего в узком диапазоне значений УКМ, на котором испарение убывает. Также для существования полимодального распределения необходимо, чтобы среднее значение притока воды в море и его дисперсия принадлежали определенным интервалам, определяемым параметрами испарения и стока в КБГ.

Литература

1. Хубларян М.Г., Найденов В.И. О тепловом механизме колебаний уровня водоемов // Доклады АН СССР. 1991. Т. 319, № 6. С. 1438—1444.
2. Фролов А.В. Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С.120–128.

Нелинейный подход к анализу ансамблей моделей земной системы на примере динамики Эль-Ниньо — Южного колебания

Мухин Д.Н., Сафонов С.Е.
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
mukhin@ipfran.ru

Ключевые слова: *ансамбли моделей земной системы, метастабильность, прогноз климата*

Традиционный анализ ансамблей реализаций моделей земной системы (МЗС) опирается на линейное разделение динамики на вынужденную и внутреннюю компоненты, что искажает нелинейную природу климата и не учитывает возможность существования метастабильных долгоживущих режимов. В докладе обсуждается нелинейная парадигма анализа ансамблей МЗС, представляющая мультимодельный ансамбль в виде сетевого графа и направленная на выделение кластеров — сообществ реализаций, отвечающих метастабильным режимам. Метод основан на расчете меры близости между реализациями, отражающей пересечение доминирующих многообразий, на которых «живет» каждая реализация в едином многомерном пространстве состояний климатической системы. Такая мера используется далее для построения графа и его кластеризации по алгоритму максимизации модулярности. Апробация подхода на экспериментах MMLEA2 для Эль-Ниньо — Южного колебания (ЭНЮК) показала, что как ансамбль одной модели может содержать различные кластеры, так и один кластер может включать в себя подмножества ансамблей разных МЗС. Выделенные кластеры обладают различными динамическими свойствами, демонстрируя сдвиги доминирующих периодов (с ~3,5 до 7 лет) и различия в асимметрии распределений. Классификация данных исторических наблюдений через их вклад в модулярность сети позволила ассоциировать реальный климат с конкретным кластером без искажения топологии графа. Предложенный подход открывает перспективы корректировки и снижения неопределенности климатических проекций на базе ансамблей МЗС. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-12-00388-П.

Облачность и облачно-радиационный эффект в Арктике: сравнительный анализ глобальных моделей CMIP6 и спутниковых данных CERES

Нарижная А.И.[1], Чернокульский А.В.[1,2], Латонин М.М.[1,3], Семенов В.А.[1,2], Wan L.[1,4]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[3]*Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург, Россия*
[4]*Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing, China*
alexandra.narizhnaya@yandex.ru

Ключевые слова: *климат Арктики, глобальные климатические модели, спутниковые данные, облачно-радиационный эффект, свойства облаков, атмосферная радиация*

В данной работе проведен анализ облачно-радиационных характеристик атмосферы Арктики по данным модельных экспериментов с глобальными моделями CMIP6 в сравнении со спутниковыми наблюдениями CERES. Рассматривались облачный радиационный эффект (ОРЭ), определяемый как разность нисходящих радиационных потоков при фактической облачности и в условиях безоблачной атмосферы, и облачный радиационный форсинг (ОРФ), рассчитываемый как соответствующая разность результирующих радиационных потоков на уровне подстилающей поверхности. Использовались данные с месячным разрешением для всего арктического региона (севернее 65°с.ш.). Сравнительный анализ проводился для периода с 2001 по 2014 гг. для разных сезонов и для разных условий сплоченности морского льда (СМЛ): СМЛ <15% (открытая вода); СМЛ от 15% до 80% (переходная сплоченность льда); СМЛ >80% (сплошной лед).

Анализ показал, что модели CMIP6 в целом воспроизводят сезонный ход ОРЭ и ОРФ в Арктике, характеризующийся положительными значениями в зимний период и отрицательными — в летний. Зимой значения ОРФ по данным CMIP6 составляют от +30 до +38 Вт/м², ОРЭ — от +29 до +36 Вт/м², тогда как летом они снижаются до −4…−12 и −23…−38 Вт/м² соответственно. При этом модели преимущественно переоценивают охлаждающее радиационное воздействие облачности в летний период по сравнению с данными CERES. Выявлено также систематическое завышение общей доли облачности относительно спутниковых наблюдений, наиболее выраженное в холодный период года. Пространственная структура рассматриваемых характеристик больше соответствует спутниковым наблюдениям в летний период.

Выделены модели, демонстрирующие наилучшее согласие с данными спутниковых наблюдений CERES. Оценена зависимость степени согласия моделей со спутниковыми данными от модельных значений равновесной чувствительности и от различных схем параметризации облачности, радиационных процессов, морского льда.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-31009.

Удаленный отклик на два типа Эль-Ниньо в полях основных метеорологических величин по данным модели ARTS-ESM-M и реанализа ERA5

Новикова А.А.[1], Железнова И.В.[1], Володин Е.М.[2]
[1]*Кафедра метеорологии и климатологии, Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
annannovikova20062003@mail.ru

Ключевые слова: *Эль-Ниньо – Южное Колебание, Каноническое Эль-Ниньо, Эль-Ниньо Модоки, удаленный отклик, ARTS-ESM-M, ERA5*

Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) – одна из ключевых мод климатической изменчивости межгодового масштаба, влияющая на погодные и климатические условия всей планеты. Современные исследователи выделяют 2 типа Эль-Ниньо: Восточно-Тихоокеанский (ВТ), или канонический и Центрально-Тихоокеанский (ЦТ), или Модоки, различающихся расположением максимума аномалий температуры поверхности океана (АТПО). Это приводит к неоднородному удаленному отклику в полях основных метеорологических параметров. В данной работе проведена оценка качества воспроизведения удаленного отклика на 2 типа Эль-Ниньо в новой версии климатической модели Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (ИВМ РАН) ARTS-ESM-M [1]. Для выделения 2 типов Эль-Ниньо был использован метод, предложенный в [2] и основанный на разложении АТПО на эмпирические ортогональные функции. Были получены карты полей полной и значимой (на уровне 90 и 95%) регрессии аномалий основных метеорологических величин (температуры воздуха на 2 м, атмосферных осадков, давления на уровне моря, геопотенциала на уровнях 850, 500 и 200 гПа) на индексы 2 типов Эль-Ниньо по данным реанализа ERA5 и 3 членов ансамбля модели ARTS-ESM-M для зимы Северного полушария за период 1940-2021 гг., а также карты комплексного отклика для температуры и осадков. Модель показала достаточно хорошее качество воспроизведения удаленного отклика основных метеорологических полей на ВТ и ЦТ Эль-Ниньо с корректным отображением пространственной структуры регрессии и ключевых очагов увеличения и уменьшения аномалий в тропической зоне. Было выявлено, что области интенсивного и статистически значимого (на уровне 90 и 95%) отклика занимают существенные площади как в тропических широтах, так и на достаточно большом удалении от региона развития Эль-Ниньо. Также было обнаружено, что пространственная структура и значимость отклика достаточно сильно отличаются для ВТ и ЦТ Эль-Ниньо: в отдельных регионах в зависимости от типа могут возникать аномалии разных знаков.

Литература

1. Volodin, E. Simulation of present-day climate, its variability, and historical changes with the ARTS-ESM-M Earth system model / E. Volodin, M. Tarasevich, V. Bragina [et al.] // J. Geophys. Res. D: Atmos. – 2026. – Preprint (Version 1).
2. Takahashi, K. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño / K. Takahashi, A. Montecinos, K. Goubanova, B. Dewitte // Geophys. Res. Lett. – 2011. – Vol. 38. – P. 1–5.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Учёт влияния тропосферных сульфатов на перенос радиации в модели промежуточной сложности

Ныров А.О.[1,2], Елисеев А.В.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
andrey.nyro@gmail.com

Ключевые слова: *модель промежуточной сложности, схема серного цикла, радиационный форсинг, сульфатный аэрозоль*

Схема серного цикла атмосферы ChAP (Chemical and Aerosol Processes) [1,2] для моделей Земной системы промежуточной сложности расширена с учетом снежных осадков в влажном выведении сульфатов из атмосферы и различия коэффициентов сухого осаждения SO_2 и SO_4 над океанами и сушей (версия ChAP-1.2). Отмеченные изменения (а также обновление данных об интенсивности антропогенных эмиссий диоксида серы в атмосферу) привели к улучшению согласия пространственного распределения массы сульфатов в тропосфере на единицу площади Земли между результатами расчета со схемой и данными реанализа CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service). В частности, в новой версии схемы значение глобальной среднегодовой массы SO_4 в тропосфере в 2004-2014 гг. составляет 0.55 TгC при среднегодовом времени жизни сульфатов 4.3 сут. Вместе с этим, был разработан модуль расчета оптической толщины тропосферных сульфатов τ_{SO_4} и их прямого (связанного с рассеянием солнечной радиации в атмосфере) и косвенного (связанного с влиянием сульфатов на микрофизические характеристики облаков) радиационного форсинга. При расчете суммарного косвенного форсинга сульфатов учитывался не только эффект Туми, но и корректировки, связанные с изменением водности и доли облаков нижнего яруса. Глобальное среднегодовое значение τ_{SO_4} в 2004–2014 гг. составило 0.017 с хорошим согласием пространственной структуры этой плотности в разные месяцы года с данными реанализа CAMS. Глобальный прямой форсинг сульфатов в среднем для 2004–2014 гг. составил -0.39 Вт м$^{-2}$, а косвенный - -0.74 Вт м$^{-2}$, что находится в пределах интервала неопределенности ОД5 МГЭИК и ОД6 МГЭИК и близко к их центральным оценкам. Следует отметить, что различные компоненты (связанные с подстройкой водности облаков и их количества) для радиационного эффекта облаков на глобальном уровне не компенсируют друг друга.

Результаты получены при поддержке проекта РНФ 25-17-00015.

Литература

1. Eliseev A. V., Gizatullin R. D., Timazhev A. V. ChAP 1.0: a stationary tropospheric sulfur cycle for Earth system models of intermediate complexity // Geosci. Model Dev. 2021. V. 14. № 12. P. 7725–7747.
2. Ныров А.О., Елисеев А.В., Мохов И.И. Усовершенствованная версия схемы серного цикла атмосферы для моделей Земной системы промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2025. Т. 61. № 4. С. 474–486.

Роль фонового состояния тропосферы в передаче стратосферного сигнала к океану в субполярной Северной Атлантике

Панасик А.В.[1,2], Зюляева Ю.А.[2,3], Гулев С.К.[2]
[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
[2]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
[3]*Факультет географии и геоинформационных технологий, Высшая школа экономики, Москва, Россия*
panasik.av@phystech.edu

Ключевые слова: *взаимодействие океана и атмосферы, турбулентные потоки тепла, циклоны, шторм-треки, ВСП, ЭНЮК*

Процессы глубокой океанической конвекции в субполярной Северной Атлантике играют существенную роль в климатической системе Земли. При этом атмосферный форсинг в зимний период активно влияет на интенсивность глубокой конвекции. В работе рассматриваются турбулентные потоки явного и скрытого тепла между океаном и атмосферой в районах глубокой конвекции – морях Лабрадор и Ирмингера. Атмосферные условия в этих районах во многом зависят от проходящих внетропических циклонов: показано, что в тыловой части циклонов наблюдается интенсификация теплопотерь океана [1]. В свою очередь, траектории циклонов и локальные центры действия атмосферы в Северной Атлантике связаны с крупномасштабной тропосферной циркуляцией. Одним из главных факторов тропосферной изменчивости в зимний период являются события внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [2]. Кроме того, важной модой климатической изменчивости, влияющей на структуру тропосферы, является Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) [3]. Целью работы было оценить отклик потоков турбулентного тепла в морях Лабрадор и Ирмингера на ВСП и выяснить, зависит ли этот отклик от фоновой фазы ЭНЮК. На основе данных реанализа ERA5 было показано, что при анализе композитов всех событий ВСП за 1940–2025 гг. статистически значимого отклика на события ВСП в потоках тепла в морях Лабрадор и Ирмингера не наблюдается. Однако при анализе композитов событий ВСП с учетом фазы ЭНЮК в соответствующий сезон было замечено, что фазы Эль-Ниньо и Ла-Нинья характеризуются 1) противоположными аномалиями потока тепла перед событиями ВСП, достигающими −38% от климатологических значений в фазе Эль-Ниньо и +15% в Ла-Нинья, и 2) противоположным по знаку откликом в потоках тепла на ВСП. При этом после ВСП разность между аномалиями потоков тепла в эти фазы уменьшается. Таким образом, оценка среднего отклика тропосферной динамики Северной Атлантики на ВСП без учёта фонового состояния тропосферы может скрывать различия между отдельными климатическими режимами.

Литература

1. Tilinina N., Gavrikov A., Gulev S. K. Association of the North Atlantic surface turbulent heat fluxes with midlatitude cyclones //Monthly Weather Review. – 2018. – Т. 146. – №. 11. – С. 3691-3715.
2. Baldwin M. P. et al. Sudden stratospheric warmings //Reviews of Geophysics. – 2021. – Т. 59. – №. 1. – С. e2020RG000708.
3. Brönnimann S. Impact of El Niño–southern oscillation on European climate //Reviews of Geophysics. – 2007. – Т. 45. – №. 3.

Динамика южной границы снежного покрова Евразии в апреле по данным MODIS и ERA5-Land (2000-2026)

Парфенова М.Р., Аржанов М.М.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
parfenova@ifaran.ru

Ключевые слова: *снежный покров, MODIS-Terra, ERA5-Land, граница*

Анализ проведён по данным MODIS (CMG 5 км, Collection 6.1) и реанализа ERA5-Land (0.1°) за апрель 2000–2026 гг. в трёх долготных секторах Северной Евразии: Европа и Скандинавия (0–40° в.д.), Западная Сибирь (40–80° в.д.), Восточная Сибирь (80–120° в.д.) в полосе 40–75° с.ш. Южная граница определялась как первая с юга широта φ, где площадно-взвешенная доля снега превышает 50%.

Ячейки данных MODIS, которые закрыты облаками, можно либо исключать из осреднения (и считать среднее только по безоблачным участкам), либо считать свободными от снега (тогда считать по всей площади, как в ERA5-Land, где пропусков нет). Ниже приведены оба варианта — для проверки устойчивости вывода.

Сектор | MODIS, безоблачные ячейки, °/10 лет | p | MODIS, облака = 0, °/10 лет | p | ERA5, °/10 лет | p

Европа 0–40° | +0.74 | 0.047 | +0.59 | 0.22 | +0.23 | 0.51

Зап. Сибирь 40–80° | +1.45 | 0.004 | +1.45 | 0.004 | +1.00 | 0.007

Вост. Сибирь 80–120° | +0.67 | 0.10 | +0.69 | 0.10 | +0.80 | 0.08

Ключевой результат — согласованный значимый сдвиг границы на север в Западной Сибири: +1.45°/10 лет по MODIS (при обоих способах учёта облаков) и +1.00°/10 лет по ERA5 ($p < 0.01$ во всех случаях). Абсолютные значения границ для этого сектора совпадают с точностью до 0.8°. Это независимое подтверждение того, что весеннее сокращение снежного покрова в Евразии наиболее выражено в западносибирском секторе и не является артефактом облачности. Полученные оценки согласуются с выводами о сокращении площади снежного покрова Евразии в весенние месяцы и её связи с приповерхностной температурой [1], а также с оценками будущих изменений по ансамблю CMIP6 [2].

В Европе и Восточной Сибири оба продукта дают слабый положительный тренд (+0.2…+0.8°/10 лет), не достигающий уровня значимости ($p > 0.05$). В Европе абсолютное положение границы в MODIS на ~2° севернее, чем в ERA5: весной средняя снежность по MODIS снижается из-за высокой облачности.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-77-00113, https://rscf.ru/project/25-77-00113/.

Литература

1. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Изменения протяженности снежного покрова в Евразии по спутниковым данным в связи с полушарными и региональными температурными изменениями // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 1. С. 78–85.
2. Парфенова М.Р., Аржанов М.М., Мохов И.И. Изменения площади снежного покрова в Евразии в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей CMIP6 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59, № 3. С. 299–308.

Тенденции изменения и взаимосвязь метеорологических полей Северного полушария в условиях современного потепления климата

Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В., Мирсаева Н.А., Аухадеев Т.Р., Николаев А.А.
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
vv@kpfu.ru

Ключевые слова: *температура воздуха, атмосферное давление, общая облачность, суммарная радиация, Северное полушарие*

В данном сообщении главное внимание уделяется анализу происходящих изменений и взаимосвязей полей температуры воздуха, атмосферного давления, общей облачности и суммарной радиации в Северном полушарии (СП) в период 1966-2025 гг. с учетом влияния макромасштабных циркуляционных процессов

Многолетние данные по указанным метеовеличинам подвергались статистической обработке.

Анализ полученных результатов показывает, что потепление с разной скоростью наблюдается над большинством районов Северного полушария в течение всего года. Наибольшей интенсивности потепление достигает в полярных районах в зимний период. Летом также преобладают положительные тенденции, но их интенсивность существенно ниже. В тропической зоне тренды значимые и составляют в среднем +0,2-0,4°С/10 лет. Положительный тренд температуры зимой над сушей более сильно выражен, чем летом. Над океанической поверхностью межсезонные изменения температуры выражены значительно слабее.

Тенденции изменения давления на территории СП имеют более сложный характер. В январе положительные тренды +0,6-+0,8 гПа/10 лет наблюдаются в Западной Сибири и на Дальнем Востоке России, на западе Северной Америки и в области Гавайского максимума. Зимой в Западном полушарии более выражена тенденция роста давления. Летом на большей части Северного полушария тренд давления имеет отрицательный знак.

Выявлено влияние циркуляционных мод на температурный и барический режимы на территории СП. Так индексы NAO и AO демонстрируют высокую положительную связь с температурой в зимний период с декабря по март над центральной и северной частью Европы и Западной Сибирью.

Отмечаются заметные пространственные и временные различия в характере корреляционных связей между индексами циркуляции и полями температуры и давления.

На термический режим Западного полушария большое влияние оказывают Тихоокеанский-Северо-Американский (PNA) и Тихоокеанский (PDO) колебания циркуляции.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-47-00122.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Применение облачного алгоритма Tripleclouds для оценки коротковолновой радиации в модели ecRad: тестирование и пути совершенствования

Петров Н.А.[1], Чубарова Н.Е.[1], Шатунова М.В.[1,2]
[1]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
nial.03@mail.ru

Ключевые слова: *ecRad, Tripleclouds, облачность, облачный алгоритм, параметр перекрытия*

В настоящее время выявлены заметные погрешности расчётов различных облачных алгоритмов радиационной модели ecRad [Hogan, Bozzo, 2018] в условиях неоднородного облачного покрова. В данной работе исследуется облачный вычислительный алгоритм Tripleclouds [Shonk, Hogan, 2008], который включает в себя эффективный инструмент для разделения облачных долей на оптически плотную и оптически тонкую доли. Проведено тестирование алгоритма Tripleclouds с детальным шагом по важнейшим модельным макропараметрам – относительному стандартному отклонению облачной воды (FSD) и параметру перекрытия облачных слоёв (α). Выявлены систематические ошибки воспроизведения прямой коротковолновой радиации в модели для различных диапазонов балла облачности, составляющие величины до нескольких сотен Вт/м2. Показано, что эти различия связаны с неточной параметризацией вертикального перекрытия соседних облачных слоёв, а также некорректными оценками оптических свойств при разделении облака в ячейке на тонкую и плотную части.

Исходя из представленных ошибок, в исследовании предлагается идея реализации модифицированной версии алгоритма Tripleclouds, в частности, состоящая в новом методе разделения оптических толщин плотной и тонкой частей облачности в ячейке.

Данные исследования важны для совершенствования радиационного блока ecRad, который используется в оперативных численных моделях прогноза погоды и климата.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-27-00014), https://rscf.ru/project/25-27-00014/.

Литература

1. Hogan R.J., Bozzo A.A. Flexible and Efficient Radiation Scheme for the ECMWF Model // J. Adv. Model. Earth Syst. 2018. V. 10. № 8. P. 1990–2008.
2. J. K. P. Shonk, R. J. Hogan. Tripleclouds: An Efficient Method for Representing Horizontal Cloud Inhomogeneity in 1D Radiation Schemes by Using Three Regions at Each Height // Journal of Climate. — 2008. — Vol. 21, № 11. — P. 2352–2370. DOI: 0.1175/2007JCLI1940.1.

Оценка качества воспроизведения поля осадков в модели ICON-Ru с использованием пакета верификации MET

Пискунова Д.А.[1,2], Шувалова Ю.О.[1], Бундель А.Ю.[1], Чубарова Н.Е.[1,2], Блинов Д.В.[1], Шатунова М.В.[1]
[1]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
daria.a.piskunova@gmail.com

Ключевые слова: *облачность, осадки, верификация, коротковолновая радиация, длинноволновая радиация*

Уточнение прогноза сильных осадков в моделях численного прогноза погоды является актуальным для широкого круга потребителей прогностической продукции. В данной работе исследуется случай сильных осадков в Московском регионе 11 августа 2026 года, когда по данным Метеорологической Обсерватории МГУ за 12 часов сумма осадков составляла 15 мм. Анализируются результаты расчетов с моделью ICON-Ru с шагом сетки 1 и 2 км с явным воспроизведением глубокой конвекции и параметризацией мелкой конвекции по схеме [Tiedtke, 1989; Bechtold et al., 2008]. Оценивается чувствительность прогноза осадков к выбору микрофизической схемы, а также влияние расчета коротковолновой и длинноволновой радиации на воспроизведение облачности и осадков в модели. Пространственная верификация прогноза осадков произведена с помощью пакета верификации MET [Brown B. et al., 2021] на основе радарных данных.

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета на 2025-2029 гг. (номер 125032004255-7).

Литература

1. Tiedtke, M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models // Mon. Weather Rev – 1989 – T. 117 – №8 – С.1779–1800
2. Bechtold, P. et al. Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales // Q. J. R. Meteorol. Soc – 2008 – T. 134 – №634 – С.1337–1351
3. Brown, B. et al. The model evaluation tools (MET): more than a decade of community-supported forecast verification // Bull. Amer. Meteor. Soc – 2021 – T. 102

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Влияние антропогенного воздействия, изменения параметров орбиты Земли и климатической чувствительности на состояние ледовых щитов Северного полушария в будущие тысячелетия

Плосков А.Н.[1], Елисеев А.В.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
aploskov@ifaran.ru

Ключевые слова: *климатические изменения, модель ледниковых щитов, будущие изменения климата*

Проведены численные эксперименты с использованием модификации двумерной изотермической по вертикали модели ледовых щитов (ЛЩ) Северного полушария для будущих 15 тыс. лет. Изменения климата при этом были заданы по результатам расчетов с моделью Земной системы промежуточной сложности Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (МЗС ИФА РАН), в которых учитывались вариации параметров орбиты Земли и антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу в соответствии с различными сценариями семейства SSP (Shared Socio-economic Pathways). Расчёты были проведены с версиями МЗС ИФА РАН, различающихся между собой равновесной чувствительностью климата к удвоению концентрации CO_2 в атмосфере (equilibrium climate sensitivity, ECS). Получено, что таяние ЛЩ максимально при сценарии SSP 5-85 с сильным антропогенным воздействием, при котором, независимо от ECS, Гренландский ЛЩ тает полностью за несколько тысяч лет с увеличением уровня Мирового океана (УМО) на 7 м. При сценарии SSP 2-45 с умеренными антропогенными эмиссиями максимальный рост УМО составляет 4 м при ECS =3.6°C и 1 м в экспериментах с ECS = 2.2°C. При сценарии SSP 1-26 увеличение уровня Мирового океана не превышает 0.5 м. Для всех проведенных численных экспериментов характерно резкое увеличение уровня мирового океана в первую тысячу лет с дальнейшим менее быстрым ростом уровня океана и достижением наибольшего значения в следующие 8 тыс. лет. В период 8 — 15 тыс. лет УМО при сценарии SSP 1-26 снижается на 2 м, а при сценарии SSP 2-45 - на 1 м.

Многолетняя динамика грозовой активности на юге Казахстана в контексте современных климатических изменений

Рахматулла Н.Е., Наурозбаева Ж.К.
АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан
nurkanat.rakhmatulla@mail.ru

Ключевые слова: *грозы, конвективная активность, опасные гидрометеорологические явления, изменение климата, юг Казахстана, Шу-Таласский бассейн*

Использованы ряды наблюдений за грозами по 12 станциям Шу-Таласского бассейна (Мерке, Кордай, Уюк, Саудакент, Толе би, Кулан, Шолаккорган, Мойынкум, Тараз, Шокпар, Хантау, Каратау; высоты 337–1141 м). Ряды охватывают 1961–2024 гг. (Каратау – с 1966 г.); для сопоставимости данные по казахстанским станциям взяты с 1981 г.

Наибольшая повторяемость гроз – в Мерке и Таразе: до 460 случаев и 450–560 ч за десятилетие, что объясняется орографией предгорий Тянь-Шаня, летним прогревом и высоким влагосодержанием воздуха.

Максимум числа гроз зафиксирован в Таразе (401–434 случая за десятилетие до 2020 г.) и Мерке (463 случая в 2001–2010 гг.), далее следуют Кулан, Шокпар и Хантау. В 2011–2020 гг. рост отмечен в Кулане (260 – 315), Хантау (188 – 300) и Толе би (82 – 217), а в Шокпаре и Уюке показатели последовательно снижаются. Минимальные значения в 2021–2025 гг. (Мерке – 160, Тараз – 193) отчасти связаны с пятилетней длиной периода: в пересчёте на год разница небольшая (Тараз – около 39 случаев в год против 43 в 2011–2020 гг.). Ряд Кордая неоднороден: 352 случая в 1991–2000 гг. и значения, близкие к нулю, в 2001–2010 и 2021–2025 гг.

Продолжительность гроз максимальна в Таразе (480–557 ч) и Мерке (437–470 ч до 2020 г.); в Хантау она выросла с 252 до 332 ч, в Толе би – с 84 до 195 ч (2001–2020 гг.). Средняя продолжительность грозы в Таразе – около 1,2 ч. В Кордае ряд неоднороден: 352 случая и 403 ч в 1991–2000 гг., в 2001–2010 и 2021–2025 гг. значения близки к нулю.

Выводы. 1) Грозовая деятельность на юге Казахстана отличается выраженной пространственной и междесятилетней неоднородностью. 2) Максимумы повторяемости и продолжительности гроз приурочены к станциям Мерке и Тараз. 3) В 2011–2020 гг. в ряде пунктов (Хантау, Толе би, Кулан) отмечено усиление конвективной активности, в 2021–2025 гг. – общее снижение показателей. 4) Для надёжной оценки трендов и их связи с изменением климата необходимы более длинные ряды и проверка однородности данных (в частности, по станции Кордай).

Литература

1. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al., eds. – Cambridge; New York, 2021. – 2391 p.
2. Кожахметов П. Ж., Кожахметова Э. П. Экстремальные метеорологические явления в Казахстане в условиях глобального потепления климата // Вестник гидрометеорологии и экологии. – 2021. – № 1. – С. 6–18

Оперативная система COSMO-Ru численного прогноза погоды Гидрометцентра России: состояние и дальнейшее развитие

Ривин Г.С.[1,2], Розинкина И.А.[1,2], Астахова Е.Д.[1], Блинов Д.В.[1], Бундель А.Ю.[1], Кирсанов А.А.[1], Никитин М.А.[1], Шатунова М.В.[1]
[1]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
gdaly.rivin@mail.ru

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

Начиная с 30 января 2024 г. для открытого использования 2 раза в год на сайте https://www.icon-model.org/ выкладывается открытый код новых версий модели ICON с треугольной сеткой (последняя версия 2026.04 появилась в апреле 2026 г., в ноябре должен появиться код модели ICON версии 2026.11). Модель ICON является бесшовной не только по времени (численный прогноз погоды (ЧПП) любой заблаговременности, моделирование климата и прогнозирование его изменений, численные эксперименты по моделированию крупных вихрей в турбулентных процессах), но и по области прогнозирования (может использоваться для моделирования процессов в атмосфере, океане и деятельном слое почвы и как глобальная модель, и как модель для ограниченной территории). В докладе предполагается

1. обсудить современное состояние, продукцию, качество и тенденцию развития системы ЧПП COSMO-Ru (Ru: Russia). В настоящее время эта система предоставляет среднесрочный (на 7 суток) ЧПП с помощью российской конфигурации ICON-Ru6/13N29 модели ICON, а для краткосрочного ЧПП для ограниченной территории с помощью российских конфигураций COSMO-Ru модели COSMO (с 2025 г. конфигурация ICON-Ru6/13N29 является оперативной, имеет 120 уровней примерно до 75 км по вертикали, а по горизонтали вложенную равномерную треугольную сетку с шагом 6,6 км севернее параллели 29,50 с. ш. на 74 нижних уровнях до примерно 23 км, на остальной (выше и южнее вложенной сетки) части глобальной сетки шаг равен 13,2 км);
2. рассмотреть дальнейшее развитие этой системы на базе подготавливаемых в Гидрометцентре России новых российских конфигураций ICON-Ru модели ICON для ограниченной территории для более детального ЧПП и подготовки ансамблей ЧПП на основе существующего и ожидаемого суперкомпьютера;
3. привести информацию об остальных докладах на конференции разработчиков системы ЧПП COSMO-Ru.

Исследование выполнено в рамках НИОКТР Росгидромета с регистрационным номером АААА-А17-117032750128-9.

Прогностическая вероятностная модель изменения припая

Рубченя А.В.[1], Май Р.И.[2]
[1]*Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия*
[2]*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*
pp6077@mail.ru

Ключевые слова: *лёд, припай, моделирование*

Пространственное положение кромки и площадь припая, помимо гидрометеорологических факторов, определяются комплексом физико-механических свойств ледяного покрова. Данное обстоятельство существенно затрудняет детерминированное численное моделирование, особенно в условиях изрезанной береговой линии. В связи с этим перспективным решением является применение стохастического подхода.

В разработанной вероятностной модели (May et al., 2026) пространственное положение припая представлено в виде набора квантильных полигонов, рассчитанных на основе электронных ледовых карт. Полученные значения вероятности пересечения полигонов (Май и др., 2022) интерпретируются как пространственный аналог функции распределения вероятностей. Это позволяет применять к исходным данным метод обратного преобразования для генерации прогнозного контура припая.

Основной методической задачей данного подхода является обеспечение временной связности выборки из равномерного распределения. Для ее решения предложен следующий алгоритм: каждый полигон, отражающий реальное состояние припая, сопоставляется с полигонами вероятности пересечений по критерию минимума площади их симметрической разности. В результате данного сопоставления формируется эмпирический временной ряд частоты появления (вероятности) припая. На основе полученного ряда строится стохастическая модель, описывающая его динамику как функцию с заданными авторегрессионными параметрами и зависимостями от гидрометеорологических предикторов.

Для описания совместной изменчивости параметров припая и внешних факторов предлагается использовать математический аппарат копул. Данный подход расширяет ранее применявшиеся методики, позволяя гибко моделировать сложную структуру взаимосвязей, включая нелинейные зависимости.

Литература

1. Stochastic Model of Landfast Ice Position Change in the Laptev Sea / R. I. May, A. G. Topaj, A. V. Rubchenia, A. B. Timofeeva // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 2026. – Vol. 36, № 2. – P. 121–128.

2. Повторяемость появления припая, вычисленная на основе анализа полигонов электронных ледовых карт (на примере Карского моря) / Р. Май, К. Р. Ганиева, А. Топаж, А. В. Юлин // Криосфера Земли. – 2022. – Т. 26, № 5. – С. 29–40

О зависимостях вариаций электрических и магнитных полей приземной атмосферы от метеопараметров холодных атмосферных фронтов

Рябова С.А.[1,2], Шалимов С.Л.[2]
[1]*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*
ryabovasa@mail.ru

Ключевые слова: *атмосферный фронт, метеопараметры, электрическое поле, магнитное поле Земли, корреляционный анализ*

В последние годы отмечается беспрецедентное увеличение количества опасных атмосферных явлений, которые вызывают не только гибель людей, крупномасштабные разрушения, но также приводят к значительному увеличению расходов на борьбу с их последствиями. Экстремальные погодные явления, как правило, являются следствием мощной циклонической активности в атмосфере. Можно ожидать, что такого рода высокоэнергичные события приводят к изменению характеристик электрического и магнитного поля приземной атмосферы. Цель настоящего исследования заключается в анализе данных инструментальных наблюдений за вариациями магнитного и электрического поля, которые обусловлены прохождением холодных атмосферных фронтов над Московским регионом. Определяются зависимости между параметрами, характеризующими прохождение фронта, и наблюдаемыми вариациями электрического и магнитного полей. Предложены возможные механизмы, интерпретирующие геофизические эффекты (вариации электрических характеристик и магнитного поля приземной атмосферы) мощных атмосферных фронтов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798-8) и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Собственная изменчивость и вынужденный отклик температуры океана в данных наблюдений и моделях Земной системы

Селезнев А.Ф.[1], Буянова М.Н.[1], Кравцов С.В.[2], Гаврилов А.С.[3], Лоскутов Е.М.[1], Фейгин А.М.[1]
[1]*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия*
[2]*Университет Висконсин-Милуоки, Милуоки, США*
[3]*Университет Валенсии, Валенсия, Испания*
aseleznev@ipfran.ru

Ключевые слова: *модели Земной системы, вынужденный отклик, собственная изменчивость*

Изменчивость температуры поверхности и теплосодержания океана, оцениваемая в экспериментах по воспроизведению климата с помощью современных моделей Земной системы (МЗС), в целом согласуется с наблюдениями на историческом интервале моделирования, однако прогностические оценки этих характеристик в будущем климате характеризуются существенной неопределенностью. Любые попытки ограничить неопределенность таких прогнозов требуют, прежде всего, тщательного анализа и сопоставления результатов моделирования за исторический период. В данной работе мы предлагаем новую объективную методологию для такого сравнения, основанную на методе представления мультимодельных ансамблей климатических реализаций в базисе низкоразмерных мод вынужденной и собственной изменчивости, которые характеризуются общими для всех моделей пространственными структурами и временными масштабами, но могут иметь отличия в характере временной динамики между различными моделями и реализациями. Мы применяем данный подход для анализа аномалий температуры поверхности и теплосодержания верхнего слоя океана, полученных в рамках экспериментов по воспроизведению исторического климата с помощью 6 МЗС CMIP6. Мы приводим примеры межмодельного сравнения вынужденного отклика и собственной изменчивости на межгодовых, субдекадных и мультидекадных масштабах между различными МЗС. Кроме того, мы предлагаем стратегию сопоставления модельных климатических симуляций с данными наблюдений; в частности, мы показываем, что в моделях отсутствуют выраженные мультидекадные сигналы, которые отчетливо прослеживаются в наблюдаемых данных, а локальные пространственные паттерны модельного отклика демонстрируют систематические расхождения с наблюдениями.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №23-62-10043.

Литература

1. Aleksei Seleznev et al. Forced and Internal Variability of Ocean Temperature Diagnosed via Multi-Model Ensemble Linear Dynamical Mode (M-ELDM) Decomposition, 20 September 2026, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-10319870/v1]

Изменчивость характеристик струйных течений в Южном полушарии по данным аэрологического зондирования за период 2001-2025 гг.

Соколова У.О., Иванова А.Р.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
UlyanaSokolovaRSAU@yandex.ru

Ключевые слова: *струйные течения, Южное полушарие, турбулентность, тренд, изменение климата*

Струйные течения (СТ), представляющие собой сильные узкие воздушные потоки в верхней тропосфере или стратосфере, характеризующиеся большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра [1], являются одним из ключевых объектов глобальной циркуляции атмосферы, информация о которых необходима для метеообеспечения авиации. Данные о положении и интенсивности СТ позволяют обеспечить экономичность и эффективность полетов, а также повысить их безопасность, поскольку со СТ связаны зоны опасной для воздушных судов турбулентности в ясном небе. Климатическая информация о СТ важна для проведения аэронавигационных расчетов с целью планирования оптимального маршрута воздушных судов.

По данным [2] были проанализированы результаты ветрового зондирования за 2001-2025 гг. на 50 аэрологических станциях в различных широтных зонах Южного полушария (574 631 запуск). Для случаев, когда на профиле ветра были зафиксированы значения, превышающие нижнюю границу скорости СТ, устанавливались характеристики, представляющие наибольшее значение для авиации (высота оси СТ, скорость и направление ветра на оси СТ, толщина струи). Рассмотрены случаи сильной изменчивости параметров СТ на профиле, обусловленные турбулентностью. Проведен сравнительный анализ полученных значений для высоты и скорости СТ с данными реанализа ERA5. Построены временные ряды среднегодовых характеристик СТ для оценки 25-летних трендов.

Анализ трендов показал, что значимое повышение высоты оси струйного течения было отмечено вблизи экватора на индонезийской станции 97072 WAML (389 м/10 лет), а также над Новой Зеландией (станция 93844 NZNV, 174 м/10 лет). Значимые тренды скорости ветра на оси струйного течения были зафиксированы на 3 станциях. При этом вблизи экватора (97372 WRKK) произошло ослабление СТ (-2.5 м/с/10лет), а над югом Африки (68842 FAPE) и юго-западом Австралии (94802 YPAL) – его усиление (2.3 м/с и 2.0 м/с за десятилетие, соответственно), что согласуется с результатами [3].

Литература

1. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. – М., Триада, 2016, 312 с.
2. https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html
3. Shaw T.A., Miyawaki O. Fast upper-level jet stream winds get faster under climate change // Nature Climate Change, vol. 14, p. 61–67, 2024.

Климат как система автоматического регулирования

Солдатенко С.А., Кравец К.А.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
soldatenko@aari.ru

Ключевые слова: *кибернетика, климатическая система, система автоматического регулирования, обратные связи, гомеостазис, бифуркация, антропоцен*

1. Традиционное рассмотрение климата как совокупности физических процессов описывает механику системы, но не объясняет ее стабильность. Кибернетический подход позволяет представить климат как саморегулирующуюся систему с контурами управления и обратными связями (ОС).
2. Климатическая система удовлетворяет всем признакам системы автоматического регулирования: наличие цели (гомеостазис), датчиков (физические процессы), исполнительных механизмов (облачность, биота) и ОС (стабилизирующих и усиливающих).
3. Совокупность исполнительных подсистем с разными постоянными времени: атмосфера (дни–недели), океан (десятилетия–тысячелетия), криосфера (годы–тысячелетия), биосфера (сезоны–миллионы лет). Подсистемы образуют каскад, где выход одной является входом для другой.
4. Иерархия контуров ОС. Отрицательные ОС обеспечивают устойчивость. Положительные ОС могут приводить к бифуркациям.
5. Наличие запаздываний в контурах приводит к перерегулированию и гистерезису климатических переходов. Климат – нелинейная САР с запаздыванием, что делает ее поведение бифуркационным и трудно предсказуемым вблизи точек перехода.
6. Человечество – активный элемент системы: как возмущение, как попытка управления, как дестабилизатор. Парадокс: пытаясь быть регулятором, человечество не имеет ни полных датчиков, ни точной модели, ни единой цели.
7. Климат – саморегулирующаяся система, созданная эволюцией. Проблема современности – рассогласование САР: антропогенное возмущение действует быстрее, чем медленные стабилизирующие контуры успевают компенсировать. Управление климатом требует настройки всей системы, а не борьбы с отдельными факторами.
8. Концептуальная модель позволяет систематизировать физические механизмы, прогнозировать поведение вблизи бифуркаций, оценивать эффективность вмешательств и понять пределы управляемости климата.

Модель земной системы ИВМ РАН поколения CMIP7 в применении к ретроспективным прогнозам на зимний сезон

Тарасевич М.А.[1,2], Володин Е.М.[1]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
mashatarasevich@gmail.com

Ключевые слова: *ARTS-ESM-M, ретроспективные прогнозы, зимний сезон*

В работе обсуждаются первые результаты серии ретроспективных прогнозов на зимний сезон (декабрь–февраль), рассчитанной с использованием новой версии национальной модели Земной системы ARTS-ESM-M, подготовленной к участию в проекте CMIP7 [1]. Прогнозы рассчитаны для периода 1993-2016 гг, размер ансамбля составляет 10 членов. Качество прогнозов основных метеорологических полей (приземной температуры воздуха, осадков, давления на уровне моря) сравнивается с ведущими зарубежными прогностическими системами, входящими в мультимодельный ансамбль C3S.

Работа выполнена в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук за счёт гранта Российского научного фонда № 22-17-00247-П. Расчёт ретроспективных прогнозов модели Земной системы ARTS-ESM-M выполнен на вычислительной системе Cray XC40-LC Главного вычислительного центра Росгидромета.

Литература

1. E. M. Volodin, et al. Simulation of present-day climate, its variability, and historical changes with the ARTS-ESM-M Earth system model // ESS Open Archive. 2026. DOI: https://doi.org/10.22541/essoar.15008013/v1

Развитие глобальной модели атмосферы ПЛАВ в контексте участия в проекте WP-MIP

Толстых М.А.[1,2,4], Фадеев Р.Ю.[1,2,3], Шашкин В.В.[1,2], Гойман Г.С.[1,3,2], Зарипов Р.Б.[2], Алипова К.А.[2,1], Мизяк В.Г.[2], Рогутов В.С.[2], Бирючева Е.О.[2]

[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*

[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*

[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*

[4]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

m.tolstykh@inm.ras.ru

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

Проект Всемирной метеорологической организации WP-MIP посвящен сравнению классических гидродинамических моделей численного прогноза погоды, моделей, основанных на машинном обучении, и гибридных моделей. Сравниваются прогнозы с заблаговременностью до 10 дней. В этом проекте участвует и гидродинамическая модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ, разработанная в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН и Гидрометцентре России, которая применяется для расчета оперативных детерминистических и ансамблевых среднесрочных и ансамблевых субсезонных и сезонных прогнозов в Гидрометцентре России [1]. В проекте WP-MIP принимает участие версия этой модели для среднесрочного прогноза с горизонтальным разрешением около 10 км (ПЛАВ10).

Обсуждаются предварительные результаты проекта WP-MIP [2]. Эти результаты в том числе показывают роль качества начальных данных в результатах прогнозов и подсказывают пути совершенствования модели.

Представлены результаты оптимизации воспроизведения спектра кинетической энергии в модели ПЛАВ10.

Описывается дальнейшее усовершенствование описания радиационных процессов в модели, а именно, применение шестидиапазонного альбедо поверхности суши по спутниковым данным MODIS вместо интегрального альбедо, показаны результаты субсезонных прогнозов по историческим данным реанализов ERA5 для различных сезонов.

Развитие версии модели ПЛАВ для субсезонного прогноза выполняется в Гидрометцентре России за счет гранта РНФ 25-17-00314.

Литература

1. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В, Зарипов Р.Б. и др. Модель долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96. - Метеорология и гидрология, 2024. № 7. С. 25-39

2. McTaggart-Cowan R. et al. WP-MIP: An Artificial Intelligence, Hybrid, and Physically Based Model Intercomparison Project for Weather Prediction. - Bull. Amer. Meteor. Soc. 2026, accepted. https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/aop/BAMS-D-26-0012.1/BAMS-D-26-0012.1.xml

Вклад внутрисезонной тропической изменчивости в генерацию Эль-Ниньо в будущем климате по данным моделей CMIP6

Умеренков И.А.[1], Гущина Д.Ю.[1], Гвоздева А.В.[1,2]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
vany0307200430@gmail.com

Ключевые слова: *MJO, ER, Эль-Ниньо, CMIP6, сигнал, связь*

Введение. Колебания Маддена-Джулиана (MJO) и экваториальные волны Россби (ER) вносят вклад в генерацию Эль-Ниньо. Весенняя интенсификация MJO запускает даунвеллинговую волну Кельвина, а летне-осенняя активность ER поддерживает сигнал заглубления термоклина. Цель работы - оценить, как этот вклад изменится при глобальном потеплении.

Методика. Использован подансамбль из 6 моделей CMIP6: ACCESS-ESM1-5, CESM2-WACCM, CMCC-CM2-SR5, EC-Earth3-CC, MIROC6 и MPI-ESM1-2-LR. Модели отобраны по качеству воспроизведения связи ВТИ/ENSO в историческом эксперименте относительно ERA5. Рассмотрены сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5 за 2015-2100 гг. MJO и ER выделялись частотно-волновой фильтрацией суточного ветра U850, интенсивность рассчитывалась как скользящее СКО. Два типа Эль-Ниньо разделялись с помощью индексов E и C. Рассчитаны кросс-корреляции индексов MJO и ER с январскими индексами E и C и тренды индекса прогностического потенциала.

Результаты. Отклик связи на потепление нелинеен. В SSP2-4.5 изменения между моделями разнонаправлены, в SSP5-8.5 картина становится согласованной. При экстремальном потеплении весенний сигнал-предшественник MJO для канонического (E) Эль-Ниньо разрушается у большинства моделей, а прогностический потенциал снижается у 5 из 6. Для центрально-тихоокеанского (C) типа, напротив, сигнал MJO усиливается или возникает, и прогностический потенциал растёт у большинства моделей. Для волн Россби асимметрия обратная: связь ER/C в SSP5-8.5 сохраняется лишь у 3 моделей, тогда как ER/E - у 5 из 6. Это указывает на перераспределение ролей ВТИ: канонический Эль-Ниньо становится более зависимым от волн Россби и менее - от MJO. Наиболее устойчивые результаты показала модель MIROC6.

Литература

1. Gushchina, D. Decadal modulation of the relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO / D. Gushchina, B. Dewitte // Clim. Dyn. – 2019. – Vol. 52. – P. 2091–2103.
2. Matveeva, T. The seasonal relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO in CMIP5 / T. Matveeva, D. Gushchina, B. Dewitte // Geosci. Model Dev. – 2018. – Vol. 11. – P. 2373–2392.

Описание облачно-радиационных связей в глобальной модели атмосферы ПЛАВ

Фадеев Р.Ю.[1,2,3], Толстых М.А.[1,2,3]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
rost.fadeev@gmail.com

Ключевые слова: *моделирование атмосферы, облачно-радиационные связи, параметризации подсеточных процессов, прогноз погоды*

Глобальная модель атмосферы ПЛАВ (полулагранжева модель, основанная на уравнении для абсолютного вихря) разработана в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН и Гидрометцентре России [1]. Существует три конфигурации модели, отличающихся пространственной детализацией: ПЛАВ10, ПЛАВ20 и ПЛАВ072L96. Основным направлением развития ПЛАВ является совершенствование ее физической составляющей с точки зрения полноты описания метеорологически важных атмосферных явлений и процессов на поверхности. Последние усовершенствования ПЛАВ включают внедрение в модель нового блока описания распространения излучения в атмосфере на базе программного кода ecrad [2], а также реализацию возможности использования климатологии аэрозолей на основе реанализа CAMS. В докладе представлены результаты исследования предсказательной способности усовершенствованной версии ПЛАВ с различной заблаговременностью. Показано, что модель относительно неплохо воспроизводит тонкую подынверсионную облачность и радиационный отклик на нее в зонах апвеллинга. Инверсия температуры и облачность нижнего яруса в зоне пассатов описывается несколько хуже.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-17-00314, https://rscf.ru/project/25-17-00314.

Литература

1 М. А. Толстых, Р. Ю. Фадеев, В. В. Шашкин и др. Модель долгосрочного метеорологического прогноза ПЛАВ072L96 // Метеорология и гидрология. – 2024. – № 7. – С. 25-39.

2 Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Бирючева Е.О., Гойман Г.С. Включение параметризации ecRad в модель ПЛАВ и ее влияние на атмосферную циркуляцию на годовом и сезонном масштабах // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 3 (397). С. 49-63.

Динамика продолжительности периода термического комфорта в городах азиатской части России по климатическим сценариям

Фалалеева В.А., Акперов М.Г., Белова И.Н., Гинзбург А.С., Докукин С.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
victory@ifaran.ru

Ключевые слова: *термический комфорт, климатические сценарии, азиатская часть России*

Изменение климата перераспределяет не только средние температуры, но и условия термического комфорта. В работе исследуется динамика продолжительности летнего периода термического комфорта (июнь–август) для 15 городов азиатской части России (АЧР), разделённых на три макрорегиона: Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Забайкалье, Дальний Восток. Комфортными считались дни, когда среднесуточная температура приземного воздуха попадала в интервал 17.2-21.7 °C, а продолжительность периода термического комфорта определялась как количество таких дней за летний сезон. Для базового периода 1981–2010 гг. использованы исторические данные о температуре приземного воздуха из сеточного массива NETCID [1], основанного на реанализе ERA Interim. Прогнозные данные получены по модели INM CM5 0 для трёх сценариев: SSP1-2.6 (низкие выбросы парниковых газов), SSP2-4.5 (умеренные выбросы) и SSP5-8.5 (высокие выбросы, сохранение текущих тенденций). Расчёты выполнены для 30-летних периодов 2011–2040, 2041–2070 и 2071–2100 гг. Для устранения систематических ошибок модельных данных применялся метод коррекции смещения (bias correction) с 15-дневным сглаживанием: для каждого дня лета по общим годам наблюдений и исторического эксперимента модели рассчитывались климатологии среднесуточной температуры и сглаживались скользящим средним по окну 15 дней (у границ сезона окно постепенно уменьшалось до 8 дней), а их разность (смещение) использовалась для коррекции модельных рядов прогнозных сценариев. Это обеспечивает сопоставимость сценариев с базовым периодом.

Результаты расчётов показали существенную пространственную неоднородность динамики числа комфортных дней. В Западной Сибири при сценарии SSP5-8.5 прогнозируется сокращение этого числа из-за выхода температур за верхнюю границу комфорта (наиболее уязвим Барнаул). В Восточной Сибири и Забайкалье, напротив, даже при SSP5-8.5 ожидается рост числа комфортных дней, поскольку потепление смещает исходно низкие температуры в сторону комфортного интервала (наиболее выражено в Кызыле и Иркутске). На Дальнем Востоке наблюдается наибольший контраст между сценариями: при SSP1-2.6 число комфортных дней стабильно, а при SSP5-8.5 прогнозируется его резкое сокращение (Владивосток, Хабаровск).

Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 125021001827-3.

Литература

1. Konstantinov, P. I. North Eurasian Thermal Comfort Indices Dataset (NETCID): New Gridded Database for the Biometeorological Studies / P. I. Konstantinov, M. I. Varentsov, N. V. Shartova. – DOI 10.1088/1748-9326/ac7fa9 // Environmental Research Letters. – 2022. – Vol. 17, no. 8. – Art. 085006.

Будущие изменения взрывных циклонов по оценкам моделей CMIP6

Цветкова Е.Ю., Школьник И.М.
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия
lizatsvetkova@gmail.com

Ключевые слова: *внетропические циклоны, взрывной циклогенез, CMIP6, изменение климата*

Проводится анализ будущих изменений характеристик «взрывных циклонов» по ансамблю 21 модели CMIP6. Используется алгоритм трекинга циклонов Университета Мельбурна, дополненный блоком идентификации «взрывных циклонов». В работе рассматривается только зимний сезон. На первом этапе исследования проводится сравнение характеристик внетропических циклонов с реанализом ERA5 для периода 1995-2014 гг. Сравнение показало, что большинство моделей недооценивает повторяемость таких циклонов на 15-25% по сравнению с реанализом, причем модели относительно высокого разрешения (с шагом сетки <100 км) занижают число циклонов в меньшей степени (на 10%) по сравнению с моделями более низкого разрешения. С внетропическими «взрывными» циклонами высокой интенсивности, имеющими скорость углубления более 24 гПа/сут, связано значительное число опасных погодных явлений (например, интенсивные осадки), поэтому их оценка имеет большое практическое значение. Анализ показывает, что число «взрывных циклонов» занижается моделями низкого разрешения почти в 2 раза относительно реанализа. Модели более высокого разрешения существенно лучше рассчитывают такие циклоны (занижение их числа относительно реанализа ~20%). На втором этапе исследования выполняется оценка будущих изменений «взрывных циклонов» для сценария SSP5-8.5 и периода 2077-2096 гг. Анализ оценок показывает, что все модели, независимо от разрешения, прогнозируют уменьшение плотности траекторий внетропических циклонов преимущественно над акваториями Мирового океана, а «взрывных циклонов» - и над сушей (в основном над территорией Северной Америки). Абсолютные значения изменений по оценкам моделей высокого разрешения оказываются в 2 раза большими по сравнению с моделями более низкого разрешения. Это указывает на целесообразность использования высокого пространственно-временного разрешения в моделях климата с точки зрения информационного обеспечения при оценке рисков, связанных с воздействиями циклонов и сопутствующими опасными погодными явлениями.

Обратные связи в системе углеродный цикл – климат в национальной модели Земной системы ARTS-ESM

Черненков А.Ю.[1,2], Володин Е.М.[1,2]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
chernenkoval97@gmail.com

Ключевые слова: *углеродный цикл, климат, модель Земной системы, ARTS-ESM*

Углеродный цикл является одним из ключевых компонентов климатической системы Земли: он определяет динамику концентрации CO_2 в атмосфере, а также оказывает влияние на радиационный баланс, циркуляцию атмосферы и Мирового океана. Антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу (прежде всего из-за сжигания топлива и землепользования) — основная причина взрывного роста его концентрации в XX–XXI вв. Наземные и океанические экосистемы в зависимости от внешних условий могут выступать как в роли стока, так и в роли источников углерода, порождая обратные связи.
Модели Земной системы (МЗС) — один из основных инструментов для исследования климата и его изменений. Они позволяют анализировать современное и прошлое состояние климатической системы, а также прогнозировать возможные будущие изменения. Надёжность таких прогнозов определяется в том числе тем, насколько достоверно модель воспроизводит биогеохимические процессы и их влияние на климат. ARTS-ESM — единственная российская модель Земной системы, участвующая в Международном проекте по сравнению совместных климатических моделей (CMIP). Данная модель позволяет проводить широкий спектр вычислительных экспериментов с различными сценариями воздействий [1, 2].
В докладе будет представлен анализ связей в системе углеродный цикл – климат в модели ARTS-ESM. Будут рассмотрены отклики климатической системы и компонент углеродного цикла в методических экспериментах с предписанным воздействием и историческом расчете, соответствующих протоколу CMIP7 Assessment Fast Track [3].
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ № 25-17-00203.

Литература
1. Volodin E. et al. Earth system model ARTS-ESM-L: basic properties, simulation of present climate and historical climate changes. PREPRINT, 2026.
2. Черненков А. Ю. и др. Моделирование углеродного цикла деятельного слоя суши и мирового океана в модели земной системы INM-CM6. Метеорол. и гидрол., 2025, №9, С. 84–98.
3. Dunne J. P. et al. An evolving Coupled Model Intercomparison Project phase 7 (CMIP7) and Fast Track in support of future climate assessment // GMD, 2025, v.18(19), p. 6671–6700.

Перспективная модель атмосферы на сетке кубическая сфера, результаты эксперимента AMIP

Шашкин В.В.[1,2,3], Гойман Г.С.[1,2,3], Марханов Д.А.[1,2,3], Третьяк И.Д.[3,1,2]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
v.shashkin@inm.ras.ru

Ключевые слова: *кубическая сфера, модель общей циркуляции атмосферы, AMIP*

В ИВМ РАН и Гидрометцентре России разрабатывается перспективная модель атмосферы для прогноза погоды и моделирования климата с высоким пространственным разрешением. Модель включает в себя блок численного решения уравнений гидротермодинамики атмосферы на сетке кубическая сфера и параметризации физических процессов подсеточного масштаба от модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ. В перспективе планируется адаптация блока физических параметризаций из модели климата INMCM/ARTS-ESM. Ключевые особенности новой модели — конечно-разностная формулировка высокого порядка точности на сетке кубическая сфера, эффективная массивно-параллельная реализация, в т.ч. на вычислительных системах, использующих графические ускорители. Модель допускает локальное повышение разрешения сетки.

Ранее динамический блок перспективной модели испытывался на идеализированных тестах по протоколу DCMIP (Dynamical Core Model Intercomparison Project) и, совместно с блоком параметризаций модели ПЛАВ, в эксперименте «аквапланета». В предлагаемом докладе анализируется воспроизведения циркуляции атмосферы моделью на сетке кубическая сфера с полным набором параметризаций подсеточного масштаба (включающим многослойную модель почвы ИВМ РАН). Будут представлены результаты эксперимента типа AMIP — запуска модели на временном масштабе порядка 10 лет с предписанной температурой поверхности океана и концентрацией морского льда. Рассматривается конфигурация модели на сетке низкого разрешения (около 110 км), которую мы считаем базовой для дальнейшего развития — построения конфигураций высокого пространственного разрешения, в т.ч. на сетке с локальным сгущением.

Ветровалы в лесной зоне России, вызванные шквалами и смерчами, и условия их возникновения по данным реанализа ERA5

Шихов А.Н.[1,2], Чернокульский А.В.[1], Ярынич Ю.И.[1], Ажигов И.О.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
and3131@inbox.ru

Ключевые слова: *ветровалы, шквалы, смерчи, реанализ ERA5, конвективные параметры атмосферы*

Рассматриваются условия возникновения более 1000 случаев шквалов и смерчей, вызвавших ветровалы в лесной зоне России, в период с 1984 по 2025 гг., по данным реанализа ERA5. Для каждого случая определены дата и время возникновения на основе данных наблюдений метеостанций, сообщений об ущербе и снимков с метеорологических спутников. В основном использованы снимки с геостационарных спутников серии Meteosat и HIMAWARI-8 (для регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока), а за период до 2002 г. – также снимки полярно-орбитальных спутников NOAA. Для случаев, у которых была известна дата и время возникновения с точностью ±1 ч, определены значения 19 конвективных параметров атмосферы на основе ранее созданной базы данных. Эти параметры характеризуют основные ингредиенты для развития глубокой влажной конвекции – неустойчивость и влагосодержание воздушной массы, сдвиги ветра и завихренность, а также их сочетания (композитные параметры). На основе полученной базы данных определены региональные особенности возникновения шквалов и смерчей по макрорегионам (Европейская часть России, Западная Сибирь, Восточная Сибирь и Дальний Восток). Выявлены и объяснены статистически значимые различия по некоторым характеристикам штормов и конвективным параметрам в этих регионах, также выполнено сопоставление с ранее опубликованными значениями повторяемости экстремальных значений конвективных параметров. Выделены особенности явлений, которые формировались при наиболее экстремальных значениях композитных параметров WMAXSHEAR и Significant Tornado Parameter

Микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля на высокогорном плато Шаджатмаз в мае 2000 года

Артамонова М.С., Обвинцев Ю.И., Сеник И.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
artamonova@ifaran.ru

Ключевые слова: *натурные измерения, Шаджатмаз, массовая концентрация аэрозоля, PM1, PM2,5, PM5, обратные траектории*

Представлены проанализированные экспериментальные данные изменчивости дисперсного состава аэрозоля полученные в период экспедиционных измерений с 30.04.2000 по 11.05.2000 на Кисловодской высокогорной научной станции (КВНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, расположенной на плато Шаджатмаз в зоне альпийских лугов на высоте 2070 м над уровнем моря. Результаты этих исследований положили начало мониторинговых измерений аэрозоля на КВНС с 2006 г. по настоящий момент.

Измерения проводились с помощью 9-ти канального лазерного аэрозольного счетчика (ЛАС), с диапазоном регистрации аэрозольных частиц 0,15- 1,5 мкм (НИФХИ им. Л.Я. Карпова).

Приводятся данные об изменчивости дисперсного состава аэрозольных частиц в этот период, их концентрации в сопоставлении с данными обратных траекторий прихода воздушных масс в точку измерений. В период наблюдения зафиксировано прохождение 7 -ми холодных фронтов, 3-х фронтов окклюзии и 2-ух антициклонов. Концентрации аэрозольных частиц в период наблюдения не превышали 6 – 7 мкг/м3 в атмосферном воздухе. Исключение составили относительно высокие концентрации 11 – 12 мкг/м3 10.05.2000, когда был зарегистрирован сильный ветер до 15 м/с. Как показал анализ дисперсных частиц, рост концентрации был вызван увеличением частиц конденсационной моды (от 0,1 до 1 мкм). Расположение станции на высоте 2070 м исключает влияние местных и региональных источников загрязнения в этом эпизоде, а говорит о приходе северо-западной воздушной массы из промышленных районов с высоким содержанием частиц данной моды. Выявлен механизм осаждения аэрозоля в ночные часы (эпизод 05.05.2000), переносимого на больших высотах над КВНС под действием горно-долинного ветра.

Экспериментальные исследования аэрозоля в Крыму: зима и весна 2024-2025 гг.

Артамонова М.С.[1], Чхетиани О.Г.[1], Лапченко В.А.[2], Максименков Л.О.[1], Иорданский М.А.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского — природный заповедник РАН — филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», Феодосия, Республика Крым, Россия*
artamonova@ifaran.ru

Ключевые слова: *массовая концентрация аэрозоля, дисперсный состав, Крым, обратные траектории*

Представлены результаты сезонных измерений аэрозоля в приземном слое атмосферы зимой (с декабря 2024 г. по май 2025 г. и декабрь 2025 г.) на станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ) КНС – ПЗ РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ, расположенной в Карадагском заповеднике на юго-востоке Горного Крыма. Измерения на станции проводятся с 2018 года по настоящий момент.
Для измерения счетной концентрации аэрозоля использовался отечественный 9-канальный аэрозольный оптико-электронный счетчик ОЭАС с диапазоном каналов 0,2-5 мкм, соответственно. Отбор проб для определения среднесуточной массовой концентрации аэрозоля и для проведения элементного анализа аэрозоля производился на фильтры АФА-ХА-20 (аспирационными пробоотборниками) со скоростью прокачки 14 м^3/ч. Время отбора каждой пробы составляло 24 часа. Одновременно на станции проводятся измерения метеорологических параметров.
Приведена массовая концентрация аэрозоля по взвешенным фильтрам для указанного периода измерений на СФЭМ, которая варьировалась в зимний период от 2 до 41 мкг/м^3, весной - от 3 до 59 мкг/м^3. Определены вариации среднесуточной массовой концентрации аэрозоля PM1, PM2,5 и PM5 в сопоставлении с метеорологическими параметрами и данными реанализов MERRA-2 и CAMS для указанного периода. Приведен дисперсный состав аэрозоля на СФЭМ для указанного периода измерений. Проведен корреляционный анализ метеорологических параметров атмосферы, для определения влияния их изменения на результаты измерений аэрозоля. Для определения источников аэрозоля, эмиссия от которых вносит вклад в общий уровень аэрозоля, зарегистрированный на СФЭМ, проведен траекторный анализ прихода воздушных масс в точку измерений.

Литература

1. Артамонова М. С., Чхетиани О. Г., Иорданский М. А., Максименков Л. О., Лапченко В. А. Временные вариации элементного и дисперсного состава атмосферного аэрозоля на юго-востоке Крыма весной-летом 2020 года // Оптика атмосферы и океана. 2026. Т. 39, № 5, 2026С.436-447. DOI: 10.15372/AOO20260510 436.

Экспериментальные исследования аэрозоля на 3-х станциях юга России в 2025 г.

Артамонова М.С.[1], Чхетиани О.Г.[1], Сеник И.А.[1], Лапченко В.А.[2], Иорданский М.А.[1], Максименков Л.О.[1]

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

[2]*Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского — природный заповедник РАН — филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», Феодосия, Республика Крым, Россия*

artamonova@ifaran.ru

Ключевые слова: *дисперсный состав и массовая концентрация аэрозоля, Цимлянск, плато Шаджатмаз, Крым, обратные траектории*

Представлены результаты измерений аэрозоля в 2025 г. одновременно на 3-х научных станциях на юге России: на станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ) КНС – ПЗ РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ, расположенной в Карадагском заповеднике на юго-востоке Горного Крыма, на Цимлянской научной станции ИФА (ЦНС) и на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА (КВНС). Одновременные наблюдения аэрозоля на 3-х станциях проводятся с августа 2023 года по настоящий момент и сопровождаются измерением метеорологических параметров.

Для измерения счетной концентрации аэрозоля на станциях используются отечественные 9-канальные аэрозольные счетчики (НИФХИ им. Л.Я. Карпова). На ЦНС установлены лазерный (ЛАС-П) и оптико-электронный (ОЭАС) аэрозольные счетчики с диапазоном каналов 0,15 - 1,5 мкм и 0,2 - 5 мкм, соответственно. На СФЭМ установлен ОЭАС, на КВНС установлен ЛАС-П. Отбор проб для определения среднесуточной массовой концентрации аэрозоля на СФЭМ и для проведения элементного анализа аэрозоля производится на фильтры АФА-ХА-20 (аспирационными пробоотборниками). Время отбора каждой пробы составляло 24 часа.

Приведена среднесуточная массовая концентрация аэрозоля на станциях за 2025 год. На СФЭМ определена массовая концентрация аэрозоля по взвешенным фильтрам для указанного периода измерений, которая варьировалась в 2025 году от 2 до 57 мкг/м^3. На указанных станциях определены вариации среднесуточной массовой концентрация аэрозоля PM1, PM2,5 и PM5 в сопоставлении с метеорологическими параметрами и данными реанализов MERRA-2 и CAMS для указанного периода. Приведен дисперсный состав аэрозоля на станциях в 2025 г. Проведен траекторный анализ прихода воздушных масс на станции измерений для эпизодов с максимальной массовой концентрацией аэрозоля, для выявления источников эмиссии аэрозоля, внесших наибольший вклад в величину массовой концентрации. Выявлены и проанализированы эпизоды, когда все станции находились под влиянием одной воздушной массы.

Связь вариаций приземного электрического поля с аэрозольной оптической толщей в условиях задымления атмосферы над г. Томском

Ахмадалиева С.Х.[1], Пустовалов К.Н.[1,2], Нагорский П.М.[1]
[1]*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*
[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
syrgaahmed01@gmail.com

Ключевые слова: *атмосферное электричество, градиент потенциала, аэрозольная оптическая толща, дымовые шлейфы, лесные пожары, спутниковые данные*

Приземное электрическое поле (ПЭП) чувствительно к ионному составу воздуха, который контролируется аэрозолем [1, 2]. Связь подтверждена в Гималаях (корреляция с $PM_{2.5}$ и аэрозольной оптической толщей (AOD)) [3] и в условиях «хорошей погоды» [4]. Для г. Томска и прилегающих территорий показано, что при задымлении суточный ход поля меняет знак, достигая ±300 В/м [5]. Однако связь ПЭП именно с интегральными характеристиками аэрозоля (AOD) в периоды задымлений над югом Сибири остаётся слабо изученной. Цель работы – оценка связи вариаций ПЭП с AOD во время задымлений от лесных пожаров над г. Томском в тёплый период 2026 г.

Для исследования были использованы данные измерений градиента потенциала электрического поля в ИМКЭС СО РАН (г. Томск) за май–сентябрь 2026 г. Дополнительно привлекались спутниковые данные, получены из сервера NASA Worldview (https://worldview.earthdata.nasa.gov/). В частности, были использованы RGB-композиты по данным видимых каналов спектрорадиометра MODIS и изображения AOD по данным полярно-орбитальных спутников Terra, Aqua и Suomi NPP.

Посредством дешифрирования спутниковых RGB-композитов было отобрано 21 событие с прохождением дымовых шлейфов над г. Томском. Затем по данным изображений AOD были определены значения этой величины над г. Томском в дни с событиями. На рисунке представлен пример спутниковых карт одного из отобранных событий.

Проведён анализ согласованных вариаций градиента потенциала и AOD за тёплый период 2026 г. в целом и во время отобранных событий в частности. Показано, что изменчивость ПЭП в период задымлений от лесных пожаров хорошо согласуется с изменчивостью AOD. В ходе дальнейшей работы планируется провести количественную оценку этой связи, также сопоставить результаты с ранее полученными оценками по данным реанализа CAMS. Полученные оценки могут быть использованы для создания новых методов мониторинга задымлений от лесных пожаров на основе отклика ПЭП.

Работа выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН, проект FWRG-2026-0010.

Литература

1. Harrison R.G. Aerosol-induced correlation between visibility and atmospheric electricity // J. Aerosol Sci. 2012. V. 52. P. 121.
2. Li R. at all. Diurnal variations of atmospheric electric fields on fair weather days and its correlations with aerosols, wind speed, irradiance, and relative humidity // Scientific Reports. 2025. V. 15. P. 7030.
3. Nagorskiy P.M. at all. Smoke Plumes from Wildfires and the Electrical State of the Surface Air Layer // Atmos. Oceanic Opt. 2022. V. 35, №4. P. 387.

Процессы сажеобразования и фрагментации нагретых углеродистых частиц при лесных пожарах

Барановский Н.В.
Томский политехнический университет, Томск, Россия
firedanger@yandex.ru

Ключевые слова: *математическое моделирование, сажа, аэрозоль, углеродистая частица, фрагментация, лесной пожар*

Цель работы — проведение численного моделирования процессов тепло- и массопереноса в отдельной нагретой углеродсодержащей частице с учетом образования сажи и оценки ее фрагментации в условиях теплообмена с внешней средой (в двумерной постановке). В рамках исследования разработана новая модель тепло- и массопереноса в пиролизуемой углеродсодержащей частице (hfpvth 0,003 - 0,01 м), учитывающая ее поэтапное дробление (модель «дерева фрагментации», в которой из исходной частицы образуются четыре вторичные частицы). В результате расчетов получены распределения температуры и объемных долей фаз внутри углеродсодержащей частицы для различных сценариев. Рассмотрены сценарии низовых пожаров (начальные температуры 900 К и 1000 К), верховых пожаров (1100 К) и огненных штормов (1200 К) для типичной растительности (сосна, ель, береза). В рамках двумерной математической модели углеродсодержащие частицы рассматриваются как кубические. Для описания тепло- и массопереноса в структуре частицы используется дифференциальное уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями третьего рода, при этом учитывается суммарная реакция в рамках кинетической схемы пиролиза и сажеобразования [1]. Дифференциальные аналоги уравнений в частных производных решаются методом конечных разностей со вторым порядком аппроксимации [2]. Предложены варианты использования разработанной математической модели и вероятностного критерия фрагментации для оценки аэрозольных выбросов. Рекомендации: предложенную математическую модель следует интегрировать в модели, описывающие конвективные колонны лесных пожаров и перенос аэрозолей в верхних слоях атмосферы. Кроме того, для практического применения данной модели необходимо разработать вероятностные критерии оценки воздействия на здоровье человека.

Литература

1. Baranovskiy, N.V.; Kirienko, V.A. Mathematical Simulation of Heat and Mass Transfer During Forest Fuel Pyrolysis Caused by High Temperature from Crown Forest Fire. Int. Rev. Model. Simul. (IREMOS) 2020, 13, 223.
2. Samarskii, A.A.; Vabishchevich, P.N. Computational Heat Transfer; Finite Difference Methodology; Wiley: Chichester, UK, 1995; Volume 2.

Исследование теплового воздействия аэрозоля и нагретых углеродистых частиц на ткани верхних дыхательных путей при лесных пожарах

Барановский Н.В., Голов Е.Е.
Томский политехнический университет, Томск, Россия
eeg10@tpu.ru

Ключевые слова: *математическое моделирование, аэрозоль, нагретая углеродистая частица, теплообмен, верхние дыхательные пути, воздух, лесной пожар*

Объектом данного исследования является поверхность верхних дыхательных путей человека. Цель работы — проведение численных исследований для моделирования теплопереноса в системе «слой нагретых частиц - аэрозоль — ткани человека» применительно к характерным участкам поверхности верхних дыхательных путей, с учетом слоистой структуры системы и дискретного расположения нагретых частиц в трехмерной постановке. Разработана трехмерная детерминированная математическая модель теплопереноса в системе «слой нагретых частиц - аэрозоль - ткани человека», учитывающая слоистое строение данной системы. Математическая модель представлена системой нестационарных параболических дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. Для численной реализации использован метод конечных разностей со схемой А. А. Самарского в сочетании с методом локально-одномерных схем, позволяющим расщепить трехмерную задачу по координатным направлениям [1].

Литература

1. Samarskii, A.A.; Vabishchevich, P.N. Computational Heat Transfer; Finite Difference Methodology; Wiley: Chichester, UK, 1995; Volume 2.

Тепловой эмиссионный слой в атмосфере Земли

Беляев А.Н., Николайшвили С.Ш., Репин А.Ю.
Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета, Москва, Россия
anb52@mail.ru

Ключевые слова: *эмиссионный слой, микрометеоры, мезосфера, термосфера, тепловое излучение*

За время проведения эксперимента «Терминатор» с февраля 2021 г. по сентябрь 2024 г. (экспедиции МКС-62 – МКС-71) в автоматическом режиме было получено около 215 тысяч снимков атмосферы Земли в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра, снабженных сопутствующими данными о времени съёмки, коэффициенте усиления и экспозиции фотокамер, положении и ориентации МКС в момент съёмки, положении Луны и Солнца.

В результате анализа накопленных данных, в интервале высот 80 – 100 км обнаружен эмиссионный слой, имеющий непрерывный спектр свечения в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. Обработка полученной информации показала, что эта слоистая структура постоянно присутствует в атмосфере Земли на высотах от 80 до 100 км на всех широтах Северного и Южного полушарий. Зарегистрированная эмиссия трактуется как тепловое излучение потока входящих в атмосферу раскаленных микрометеоров, а соответствующий эмиссионный слой, как слой атмосферы (80–100 км), в котором пролетающие сквозь него раскаленные микрометеорные частицы, излучают с максимальной интенсивностью. При этом речь идет о регистрации излучения не отдельных ярких метеоров, а множества слабых микрометеоров, создающих коллективный эффект теплового эмиссионного слоя, регистрируемого на протяжении всего эксперимента в любой точке ночного участка орбиты МКС. Исходя из этого, предполагается, что вокруг Земли, движущейся в зодиакальном облаке космической пыли, постоянно присутствует светящийся слой, образованный сгорающими в атмосфере частицами космической пыли, и излучающими в видимом и ближнем ИК диапазонах электромагнитного спектра [1]. Яркость этого теплового эмиссионного слоя пропорциональна интенсивности притока метеорного вещества в атмосферу Земли, являющегося значимым климатообразующим фактором.

Влияние высоты слоя перемешивания на приземное содержание загрязняющих примесей в городском воздухе по измерениям на станции ИФА РАН в центре г. Москвы

Березина Е.В.[1], Васильева А.В.[1], Губанова Д.П.[1], Беликов И.Б.[1], Белоусов В.А.[1], Артамонов А.Ю.[1], Моисеенко К.Б.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Российский университет транспорта, Москва, Россия*
e_berezina_83@mail.ru

Ключевые слова: *высота слоя перемешивания, газовые примеси, аэрозоли, качество воздуха, состав городского воздуха*

Как известно, высота слоя перемешивания (ВСП) является одним из ключевых факторов, определяющих степень загрязнения городского приземного воздуха [1]. Для исследования влияния ВСП на содержание наиболее важных загрязняющих примесей в приземном воздухе центра г. Москвы, проведён анализ данных одновременных измерений вертикальных профилей температуры в слое 0–1000 м с использованием микроволнового температурного профилемера (МТП-5) и приземной концентрации газов (CO, CO_2, NO_x, CH_4, O_3) и аэрозолей ($PM_{2.5}$, PM_{10}) в период с июля 2022 по сентябрь 2023 гг. на станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН). ВСП по данным МТП-5 определялась по отсутствию или наличию инверсий температуры, а также методом частицы [2]. Отмечены значимые различия ВСП, полученной двумя методами. Исследована изменчивость приземной концентрации газовых примесей и аэрозолей в городском воздухе с ростом ВСП до 1000 м. Установлено, что наибольшие концентрации CO, CO_2, NO_x, CH_4, $PM_{2.5}$ и PM_{10} (и наименьшие – O_3) приходятся на нижний 100-150 метровый слой (в котором скорость ветра минимальна), как в холодный, так и в тёплый периоды измерений.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФА РАН № 25020501413-6

Литература

1. Geiß, A. Mixing layer height as an indicator for urban air quality? / A. Geiß, M. Wiegner, B. Bonn [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. — 2017. — Vol. 10, No. 8. — P. 2969–2988. — DOI: 10.5194/amt-10-2969-2017.
2. Methodical Office of the Hydrometeorological Center of Russia. Available online: http://method.meteorf.ru/norma/rec/profile.pdf

Регрессионная оценка аэрозольного загрязнения воздуха весной в Московском регионе на сетке с разрешением 250 метров

Борисов Д.В.[1,2], Виноградова А.А.[1], Губанова Д.П.[1], Варенцов М.И.[1,2,3], Самсонов Т.Е.[2,3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[3]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
lbj23.98@mail.ru

Ключевые слова: *аэрозольное загрязнение, машинное обучение*

Метод Land-use regression (LUR) — устоявшийся способ оценки среднегодового или среднесезонного загрязнения воздуха в регионе в виде непрерывного высокоразрешенного поля концентрации примеси: строится линейная зависимость среднего измерения на станции от предикторов, описывающих территорию вокруг станции, по данным землепользования. Затем полученное уравнение переносится на всю сетку данных землепользования [1].

Впервые разработана модель LUR для Московского региона с применением данных землепользования с шагом сетки 250 м. Использованы измерения массовой концентрации твердых взвешенных частиц PM_{10} на 19 станциях ГПБУ “Мосэкомониторинг” за 2024-2026 гг., осредненные за март (максимум сезонной изменчивости концентрации PM_{10}). Из сеточных данных о землепользовании [2] и открытых векторных данных OpenStreetMap были отобраны 9 предикторов, относящиеся к загрязнению (близость станции к дороге, загруженность дороги, доля городской застройки в ячейке и др.). Набор предикторов искусственно расширен значениями, взвешенно осредненными по площади окружности вокруг станции с заданным радиусом (500 м, 1 км, 3 км). Проведен исчерпывающий поиск наилучшей модели из 381 подмножества предикторов размера 1-5 по метрике на независимой выборке. Итоговая модель включила 2 предиктора – доля площади дорог в ячейке 250 м и доля площади городской застройки в радиусе 250 м от станции.

Результаты проверки полученной модели LUR на независимой выборке скользящим контролем (Leave One Out Cross Validation, LOOCV): R^2=0.57, RMSE=5.8 мкг/м^3, при сезонном среднем 29.1 мкг/м^3. При переносе на полную сетку с шагом 250 м модель успешно воспроизводит пространственную изменчивость загрязнения: выделяются территории с плотной застройкой, автомагистрали, парковые зоны. Проведен анализ остатков регрессии по станциям и смещений значений предикторов при переносе модели на сетку.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-27-00578, https://rscf.ru/project/25-27-00578/.

Литература

1. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution / G. Hoek, R. Beelen, K. de Hoogh [et al.] // Atmospheric Environment. – 2008. – Vol. 42. – No. 33. – P. 7561–7578.
2. Okuneva, V.V. Building Height Reconstruction Using Machine Learning and ArcticDEM Digital Surface Model / V.V. Okuneva, M.I. Varentsov, T.E. Samsonov // Moscow Univ. Phys. –2025. – Vol. 80. – Suppl. 3. – S1176–S1183.

Однородность многолетнего ряда сумеречных измерений стратосферного NO_2 в Звенигороде при смене спектральной аппаратуры

Боровский А.Н.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
borovski@ifaran.ru

Ключевые слова: *двуокись азота, стратосфера, сумерки, DOAS, многолетний*

На Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН с 1990 года ведутся сумеречные спектрометрические измерения содержания NO_2 в стратосфере методом DOAS. Ряд таких измерений – один из наиболее продолжительных в Северной Евразии и используется для анализа долговременной изменчивости стратосферного NO_2 и валидации спутниковых данных. В 2017 г. наряду с прибором на базе монохроматора МДР-23 введён в эксплуатацию прибор нового поколения на базе спектрографа Shamrock-303i. Для сохранения однородности ряда требуется количественное согласование данных обоих приборов.

Целью текущего этапа работы является сопоставление данных измерений содержания NO_2 в наклонном столбе атмосферы, так как при согласованности измерений наклонных толщ обоими приборами восстановление вертикального распределения содержания NO_2 в стратосфере не зависит от характеристик приборов.

Представлены результаты сопоставления наклонных содержаний NO_2 по синхронным измерениям двух приборов за период с октября 2017 г. по февраль 2019 г. Спектры обоих приборов обработаны единым методом с настройками, которые применялись к данным измерений МДР-23 с 1990 года. Рассмотрены дифференциальные наклонные содержания в диапазоне зенитных углов Солнца от 84° до 96° отдельно для утренних и вечерних сумерек.

В результате выявлены расхождения в данных приборов. Выявлена асимметрия расхождения в утренних и вечерних данных, а также изменение смещения с ростом зенитного угла Солнца. Обсуждаются возможные причины расхождений. На данном этапе работы объединение данных двух приборов в единые однородные ряды утренних и вечерних данных требует раздельных поправок, учитывающих зависимость смещения от зенитного угла Солнца; устойчивость поправок во времени по имеющемуся 16-месячному перекрытию на данный момент не установлена и определяет погрешность сшивки.

Работа выполнена за счет средств государственных заданий ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер темы 1022041800069-7-1.5.9 (РК 125020501413-6).

Метановая эмиссия в секторе нефтедобычи Северного моря: важнейшие источники и пространственные масштабы влияния

Булохов А.В.[1], Медведков А.А.[2]
[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
[2]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
vincentrmsne@rambler.ru

Ключевые слова: *метан, CH_4, Северное море, нефтедобыча, газодобыча, выбросы в атмосферу*

Нефте- и газодобывающая отрасль Великобритании в пределах конт. шельфа Северного моря является единственным поставщиком техногенного метана в атмосферу для данного региона (кроме мор. транспорта), в основном за счёт сброса/сжигания попутного газа.
Согласно реестру выбросов Великобритании [1], на 2023 г. в Северном море находилась 91 платформа с эмиссией CH_4 равной 20 179 т. Это больше объёма, выбрасываемого от источников на суше, перечисленных в реестре (хоз. объекты всех типов, 3810 единиц, 17 938 т.), но на общем фоне выбросов метана страной (2,05 млн. т.), довольно незначительно.
Значения выбросов CH_4 от источников составляют от 1 до 36 г/с. Для расчёта концентраций метана использована Гауссова модель рассеивания примесей в атмосфере. Этот подход хорошо себя зарекомендовал при решении подобных задач [2]. Используемые параметры: высота источника 50 м, масса выброса 36 г/с, скорость ветра 5 м/с, стабильность атмосферы по Пакскуилу-Гилфорду – класс D. Таким образом, на расстоянии X=3 км от источника по оси факела концентрация метана составит 114 мкг/м^3, (175 ppb). Т.к. фоновые концентрации метана в приводном слое составляют 1930 ppb, то у платформы эти значения могут достигать 1930+175=2105 ppb (или 2,1 ppm).
По расчётам, для расстояния X=10 км от источника, концентрации метана составят 25,7 мкг/м^3, (39 ppb), т.е. значительно уменьшатся (общие концентрации составят 1969 ppb (1,97 ppm). Для более удалённых расстояний концентрации падают значительно.
Таким образом, объекты нефте- и газодобывающей промышленности британского сектора Северного моря вносят ощутимый вклад на расстоянии, измеряемом только первыми десятками километров, но в целом нефтяные платформы нельзя считать крупными поставщиками CH_4 в приводную атмосферу. Большее влияние, согласно лит. данным [3], оказывают условия постоянного ветра со стороны промышленных районов суши.
Работа финансировалась за счет средств проекта Российского научного фонда (грант №25-17-00334, https://rscf.ru/project/25-17-00334/)

Литература

1. UK National Atmospheric Emissions Inventory URL: http://naei.energysecurity.gov.uk/
2. Stuart N. Riddick, «Manning Methane emissions from oil and gas platforms in the North Sea», Atmospheric Chemistry and Physics, August 2019, 19(15):9787-9796. Vol. 19, issue 15.
3. Муравья В.О., Результаты измерений концентрации метана в атмосфере над западными морями Российской Арктики и сопоставление их с данными подводной видеосъемки. Фундаментальная и прикладная гидрофизика, Т.19, №2, стр. 52-63, 2026

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Влияние химических процессов в стратосфере Арктики на параметры стратосферы и тропосферы по результатам расчётов ХКМ SOCOLv3

Варгин П.Н.[1,2,3], Цветкова Н.Д.[1], Лукьянов А.Н.[1], Егорова Т.А.[5], Розанов Е.В.[4,5]
[1]*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия*
[2]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[4]*Лаборатория исследований озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[5]*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland*
p_vargin@mail.ru

Ключевые слова: *озоновый слой, химические процессы полярной стратосферы, ХКМ SOCOLv3, лагранжевый подход, стратосферно-тропосферное динамическое взаимодействие*

Для валидации химического блока ХКМ SOCOLv3 проведены сравнения вариаций озона и соляной кислоты с данными реанализа M2-SCREAM вдоль ансамбля траекторий внутри стратосферного полярного вихря и сформировавшихся внутри него полярных стратосферных облаков и гетерогенных реакций на их поверхности для зимнего сезона 2019-2020 г. с рекордным разрушением озонового слоя в Арктике. Модельные расчеты проводились с использованием процедуры найджинга к данным реанализа MERRA-2. Поскольку метеопараметры реанализов M2-SCREAM и MERRA-2 совпадают, рассчитанные по ним траектории являются аналогичными. Таким образом, при использовании данного лагранжевого подхода отличия в поведении химических компонент вдоль траекторий обусловлены только химическими процессами в модели. Показано, что ХКМ SOCOLv3 адекватно описывает поведение озона и соляной кислоты внутри устойчивого стратосферного полярного вихря с сильным химическим разрушением озона. Таким образом, проведённая валидация подтвердила возможность применения этой модели для исследований изменений озонового слоя, включая оценку его будущих изменений. Далее, используя результаты пяти ансамблевых расчетов ХКМ SOCOLv3 для периода с 1990 г. по 2020 г., оценено влияние химических процессов нижней стратосферы Арктики, связанных с разрушением озона, на параметры стратосферы и тропосферы. Сравнение композитов, состоящих из наиболее холодных зимних сезонов в расчетах с интерактивной химией в марте – апреле характеризуется более сильным полярным вихрем, более низкой температурой и меньшим содержанием озона в нижней полярной стратосфере, чем в расчетах без химии. Отклик в тропосфере характеризуется более низкими значениями давления в полярном регионе, соответствующими положительной фазе Арктической осцилляции (АО).

Межгодичная изменчивость массовых концентраций черного углерода и угарного газа в воздушном бассейне г. Москвы

Вишняк А.Р.[1], Горчаков Г.И.[2], Семутникова Е.Г.[1], Карпов А.В.[2]
[1]*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
adel.vishnyak@bk.ru

Ключевые слова: *аэрозоль, газовые примеси, черный углерод, угарный газ, тонкодисперсный аэрозоль*

В [1] показано, что суточный ход массовых концентраций черного углерода и тонкодисперсного аэрозоля согласуются друг с другом и отличаются сильной межгодичной изменчивостью в воздушном бассейне г. Москвы. Целью настоящей работы является исследование межгодичной изменчивости суточного хода массовой концентрации черного углерода в разные сезоны и сопоставление указанной изменчивости с внутрисуточной изменчивостью массовой концентрации угарного газа в воздушном бассейне г. Москвы. Проанализирована по данным круглосуточных измерений в г. Москве на ул. Б. Ордынка в 2022 – 2024 гг. изменчивость массовой концентрации черного углерода (сажевого аэрозоля) в весенний, летний, осенний и зимний сезоны года. Выявлены наиболее характерные особенности сезонной изменчивости суточного хода концентрации черного углерода в разные годы. По данным мониторинга на АСКЗА Шаболовка (ГПБУ «Мосэкомониторинг») рассчитан суточный ход массовой концентрации угарного газа в 2022 – 2024 гг. для каждого года в целом и по сезонам. Выполнен сравнительный анализ общей и сезонной межгодичной изменчивости суточного хода массовой концентрации угарного газа. Выполнено сопоставление внутрисуточной изменчивости массовых концентраций черного углерода на наблюдательном пункте Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ул. Б. Ордынка) и угарного газа на АСКЗА Шаболовка для каждого года (2022, 2023, 2024 гг.) и для всех четырех сезонов года. С использованием разработанного ранее метода определены количественные характеристики степени близости суточного хода массовых концентраций черного углерода и угарного газа в воздушном бассейне г. Москвы. Выявлены сезонные и межгодичные различия степени близости вышеуказанных компонент загрязнения городской атмосферы.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием ИФА им. А.М. Обухова РАН FMWR-2025-0007 №1022041800069-7-1.5.9.

Литература

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Семутникова Е.Г., Лезина Е.А., Вишняк А.Р., Степанова Е.В., Козлов В.С., Гущин Р.А., Даценко О.И. Межгодичная изменчивость суточного хода массовой концентрации черного углерода и тонкодисперсного аэрозоля в воздушном бассейне г. Москвы // ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ / DOKLADY EARTH SCIENCES. 2026. Т. 530. № 2. С. 423–431.

Отклик нетто-экосистемного обмена CO_2 лесных экосистем внетропических широт на волны жары

Гибадуллин Р.Р., Гущина Д.Ю., Горбаренко Е.М., Железнова И.В., Масляшова А.О., Осипов А.М., Тарасова М.А., Ольчев А.В.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ravil00121@mail.ru

Ключевые слова: *волны жары, нетто-экосистемный обмен CO_2, лесные экосистемы, FLUXNET, внетропические широты, дефицит давления водяного пара, дефицит осадков, отклик NEE*

На фоне современных изменений климата растет частота экстремальных погодных явлений, в том числе периодов с аномально высокими температурами – волн жары. Особую уязвимость представляют лесные экосистемы внетропических широт, где температурные аномалии могут существенно нарушать углеродный обмен [1].
В работе использованы данные 50 лесных станций FLUXNET с рядами наблюдений не менее 15 лет за 1991-2015 гг. Для определения волн жары использованы данные о температуре из реанализа ERA5 за базовый период 1961-1990 гг и исследуемый период 1991-2015 гг. Волны жары выделялись по критерию EHF [2]. Отклик NEE оценивался как безразмерная стандартизированная аномалия потока относительно пятидневного предволнового фона с нормировкой на медианное абсолютное отклонение для соответствующего дня года (z). Для оценки влияния влажностных характеристик на отклик также были рассчитаны аномалии дефицита давления водяного пара (VPD) и 30-дневной суммы осадков (P30).
Выявлено преобладание положительных аномалий NEE (усиление эмиссии или ослабление поглощения CO_2) в период волны. Аномалия NEE достигает максимума через 2-3 дня после начала волны и иногда сохраняется более 20 дней после её окончания. Максимальные положительные значения (около 1.2 z) почти вдвое превышают по модулю отрицательные (около -0.7 z), что указывает на асимметрию отклика. Отклик пространственно неоднороден: более сильные значимые положительные отклонения характерны для бореальных и северных неморальных лесов Европы и Северной Америки, южнее 40 с.ш. сигнал ослабевает. Величина отклика возрастает с ростом VPD и дефицитом осадков: средние значения достигают 0.58-0.59 z при высоком VPD и дефиците P30 и снижаются до 0.08-0.12 при низком VPD и повышенных предшествующих осадках.
Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 26-17-00088.

Литература

1. Различия в отклике потоков CO_2 и H_2O на аномальные погодные условия в тропических, умеренных и полярных широтах / Д. Ю. Гущина и др. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2026. — Т. 62, № 2. — С. 256–280.
2. Nairn J. R., Fawcett R. J. B. The excess heat factor: a metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity //International journal of environmental research and public health. – 2015. – Т. 12. – №. 1. – С. 227-253.

Сравнительный анализ радиационных эффектов антропогенного аэрозоля в модели ICON-ART с использованием новой оптической модели

Голиков А.Д.[1,2], Чубарова Н.Е.[1,2], Кирсанов А.А.[2]
[1]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
artemgelios@gmail.com

Ключевые слова: *аэрозоль, радиационный эффект, оптические свойства*

Оптические свойства аэрозоля нужно знать для оценки его воздействия на атмосферную радиацию и другие метеорологические величины. Современные климатические и химико-транспортные модели неплохо воспроизводят концентрации и оптическую толщину антропогенного аэрозоля [1], но альбедо однократного рассеяния (SSA) и фактор асимметрии (ASY) воспроизводятся менее точно [2, 3]. В то же время, эти величины важны для оценки радиационного эффекта, т.к. определяют поглощение и обратное рассеяние радиации частицами.

Новая модель антропогенного аэрозоля для ICON-ART представляет собой смесь из грубой и тонкой фракций, имеющих логнормальные распределения. Соотношение между типами аэрозоля (водорастворимыми и нерастворимыми частицами, сажей и пылью) в этой модели фиксировано, аналогично OPAC [4], и оптические свойства зависят только от радиуса частиц. Расчет оптических свойств проводился в программе MOPSMAP [5], в качестве входных параметров были использованы данные обратного моделирования AERONET [6], а также доли черного углерода и минеральной пыли, полученные по измерениям в МО МГУ. Относительная ошибка для объемного коэффициента ослабления не превышает 15%, для SSA и ASY: около 3 – 5%.

Оценка радиационного эффекта аэрозоля (ARE) с обновленными свойствами проводилась с помощью модели ICON-ART и сравнивалась с измерениями AERONET и предыдущими оценками, полученными с помощью модели COSMO-ART [3] за период с 28.04.2019 по 08.05.2019. Значения ARE в обеих моделях близки, но в ICON-ART радиационный эффект сильнее выражен на ВГА (-10..-15 Вт/м^2 в ICON-ART и -5..-12 Вт/м^2 в COSMO-ART) и слабее выражен на НГА (-15..-25 Вт/м^2 против -20..-30 Вт/м^2). Это объясняется главным образом более высоким – и более близким к измеренному – альбедо однократного рассеяния. в ICON-ART: по измерениям оно составило 0.92 — 0.94, в ICON-ART составило 0.88 — 0.9, а в COSMO-ART — 0.72 — 0.76.

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательских работ Росгидромета на 2025-2029 гг. (№125032004255-7).

Литература

1. Terrenoire et al., 2015
2. Andrews et al., 2016
3. Chubarova et al.,2024
4. Hess et al., 1998
5. Gasteiger, Wiegner, 2018
6. Dubovik, King, 2000

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в экстремальных смогах и дымах

Горчаков Г.И.[1], Семутникова Е.Г.[2], Карпов А.В.[1], Гущин Р.А.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
gengor@ifaran.ru

Ключевые слова: *аэрозоль, смог, дымная мгла, оптическая толщина, поглощение, чёрный углерод, коричневый углерод*

При глобальном мониторинге оптических и микрофизических свойств аэрозоля необходимо знать диапазоны изменчивости важнейших характеристик. Предметом исследования в данной работе являются характеристики крупномасштабных оптически плотных дымок, определяемых по глобальной сети станций AERONET: дымная мгла, пыльная мгла, антропогенно обусловленные смоги.

В смогах на Великой Китайской Равнине аэрозольная оптическая толщина (AOT) может превышать 5,0. В нефтехимических зимних и в летних экстремальных (по AOT) смогах альбедо однократного рассеяния может достигать 0,98–0,99 («белый смог»). Поглощательная способность аэрозоля определяется чёрным углеродом (BC), коричневым углеродом (BrC) и аномальным (умеренным) селективным поглощением.

Обнаружены нефотохимические дымки с неселективным поглощением, когда мнимая часть коэффициента преломления достигает 0,5 (дымная мгла в Канаде и пригороде Пекина).

Впервые обнаружено аномальное умеренное поглощение дымового аэрозоля и в нефтехимических дымках. Мнимая часть коэффициента преломления на длине волны 1020 нм достигала в дымной мгле 0,316.

В смогах заметный вклад на длине волны 440 нм может вносить коричневый углерод (BrC). При массовых лесных пожарах в Канаде на длине волны 440 нм вклад коричневого углерода достигал 0,28. При этом наблюдался степенной спектр мнимой части коэффициента преломления с показателем 1,5 в области спектра от 440 до 1020 нм.

В пыльной мгле на Ближнем Востоке обнаружено селективное поглощение минеральным пылевым аэрозолем на длине волны 675 нм, обусловленное содержащимся в частицах минералом гётит. В этих случаях наблюдались уникальные спектральные зависимости мнимой части коэффициента преломления, альбедо однократного рассеяния и аэрозольной оптической толщины поглощения.

Работа выполнена в ИФА им. А.М. Обухова РАН по Госзаданию FMWR-2025-0007 №1022041800069-7-1.5.9.

Сходства и различия состава городского аэрозоля при нетипичных воздействиях разного происхождения

Губанова Д.П.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gubanova@ifaran.ru

Ключевые слова: *атмосфера, городской аэрозоль, элементный состав, распределение по размерам, массовая концентрация, счетная концентрация, природные и антропогенные воздействия, перенос воздушных масс, метеорологические параметры, Москва*

Для лучшего понимания механизмов генерации, трансформации, переноса и распада аэрозолей, обусловленных турбулентностью и динамикой атмосферы, необходима информация о микроструктуре и составе аэрозольных частиц [1]. Эти физико-химические характеристики аэрозолей подвержены пространственно-временной изменчивости, которая усиливается в атмосфере крупных городов и агломераций под влиянием специфических факторов (ветровой режим, орография, каньоны улиц, городской остров тепла, антропогенные тепловые потоки, урболандшафты, неравномерность застройки, множество разных локальных источников). Нетипичные для исследуемого региона природные и антропогенные воздействия разного генезиса [2] также вносят значительный вклад в изменение различных параметров аэрозольных частиц.

Данное исследование связано с выявлением особенностей вариаций состава и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля в Московской агломерации при таких воздействиях. Использованы экспериментальные данные, полученные по результатам непрерывных наблюдений, проводимых Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в центре Москвы и на Звенигородской научной станции института [3]. Обсуждаются сходства и различия геохимического профиля, распределения частиц по размерам, величин и их отношений счетной и массовой концентрации субмикронных и грубодисперсных аэрозолей (Nsub/Ncoarse, PM2.5/PM10) во время редких и нетипичных для Московского региона событий. Рассмотрены эпизоды регионального переноса аэрозолей горения из зон пожаров, дальнего переноса пыли из районов пыльных бурь в Северном Прикаспии, интенсивной работы близкого локального источника, а также – очищения городского воздуха от загрязняющих примесей при вторжении арктических воздушных масс и вследствие снижения антропогенной нагрузки во время локдауна при пандемии COVID-19 весной 2020 года.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-27-00578, https://rscf.ru/project/25-27-00578/.

Литература

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York: Wiley, USA, 2016. 1152 p.
2. Губанова Д.П. // Оптика атмосферы и океана. – 2026. – Т. 39. – № 6. – С. 459–468. DOI: 10.15372/AOO20260601.
3. Виноградова А.А. [и др.] // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2026. – Т. 62. – № 2. – С. 281-305. DOI: 10.7868/S3034648726020081

Распределение частиц дымового аэрозоля по размерам при степных пожарах в саванне

Гущин Р.А., Горчаков Г.И., Карпов А.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
gushchin@ifaran.ru

Ключевые слова: *дымовой аэрозоль, распределение частиц, степные пожары, саванна, оптическая толщина, поглощение*

В ряде работ изучены оптические и микрофизические характеристики дымового аэрозоля при массовых лесных пожарах [1]. В данной работе исследуются характеристики дымового аэрозоля при степных пожарах (в саванне).

Большой интерес представляет изменчивость спектра ослабления аэрозоля. В области спектра 440–870 нм спектральные зависимости аэрозольной оптической толщины аппроксимируются степенными функциями. По данным мониторинга на станции Mongu_Inn в августе 2022 г. наблюдались заметные отклонения от этих аппроксимаций («вогнутые спектры»). При построении спектра ослабления в диапазоне длин волн от 340 до 1620 нм оказалось, что эти спектры являются выпуклыми. Анализ эмпирических функций распределения аэрозольной оптической толщины показал, что её модальные значения меняются примерно от 0.15 до 0.50 при изменении длины волны от 1020 до 440 нм. В августе 2022 г. показатель Ангстрема для спектров ослабления в области 440–870 нм менялся от 1.6 до 2.0 (модальное значение примерно 1.78), а для соответствующих спектров поглощения — примерно от 1.0 до 1.7 (модальное значение примерно 1.3). В распределении частиц по размерам доминировала тонкодисперсная фракция дымового аэрозоля с модальным радиусом примерно от 0.1 до 0.2 мкм. Модальный радиус грубодисперсной фракции аэрозоля варьировал примерно от 4 до 6 мкм.

Дымовой аэрозоль при пожарах в саванне оказался сильно поглощающим по сравнению, например, с дымовым аэрозолем при лесных пожарах на Аляске [1]. Мнимая часть коэффициента преломления на длине волны 440 нм варьировалась примерно от 0.01 до 0.04 (при среднем значении около 0.03).

Авторы благодарят команду AERONET за возможность использования данных мониторинга оптических и микрофизических характеристик аэрозоля. Работа выполнена в ИФА им. А.М. Обухова РАН по Госзаданию FMWR-2025-0007 №1022041800069-7-1.5.9.

Литература

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И., Семутникова Е.Г. Черный и коричневый углерод и селективное поглощение радиации дымовым аэрозолем при массовых лесных пожарах на Аляске в 2019 г. и в Канаде в 2023 г. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38, № 1(432). С. 32–38.

Поглощательная способность аэрозоля в зимних и летних смогах и дымках г. Пекина в 2012–2013 гг.

Даценко О.И.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
datsenko@ifaran.ru

Ключевые слова: *аэрозоль, смог, дымка, поглощение, чёрный углерод, коричневый углерод, Пекин*

В [1] показано, что в нефотохимических смогах и дымках на поглощательную способность аэрозолей заметно влияют коричневый углерод и аномальное, а также умеренное селективное поглощение [2]. Как известно, в летний сезон определяющий вклад в процессы смогообразования в мегаполисах вносят фотохимические процессы. Целью настоящей работы является анализ среднемесячных и экстремальных оптических характеристик аэрозоля в смогах и дымках по данным мониторинга на станции AERONET Beijing_RADI в течение 2012–2013 гг.

Важной характеристикой антропогенно обусловленных смогов и дымок является спектральная зависимость аэрозольной оптической толщины ослабления. Однако не следует отвергать возможное заметное влияние на Северной Китайской Равнине нефотохимического механизма смогообразования.

Аэрозольная оптическая толщина в смогах на длине волны 440 нм для среднемесячных спектров менялась от 2.38 в летний сезон до 1.23 в зимний.

Параметр Ангстрема (степенная аппроксимация) для области длин волн 440–870 нм варьировал в пределах от 1.10 до 1.41, а для области спектра 675–1020 нм — от 1.15 до 1.60. В дымках средние значения аэрозольной оптической толщины менялись от 0.60 до 0.73, а показателя Ангстрема — от 1.02 до 1.47 (область спектра 440–870 нм).

Повышенные в смогах значения (примерно до 0.022 в декабре) мнимой части коэффициента преломления наблюдались, как правило, на длине волны 440 нм («коричневый углерод»).

На длинах волн 870 и 1020 нм указанные вариации были обусловлены умеренным селективным поглощением [2].

В дымках мнимая часть коэффициента преломления на длине волны 440 нм достигала 0.035 (в сентябре). Вклад чёрного углерода составлял около 0.120, а коричневого углерода примерно 0.015.

Автор благодарит команду AERONET за возможность использования данных мониторинга оптических и микрофизических характеристик аэрозоля.

Работа выполнена в ИФА им. А.М. Обухова РАН по Госзаданию FMWR-2025-0007 №1022041800069-7-1.5.9.

Литература

1. Gorchakov G.I. et al. Microstructure and Absorption Capacity of Aerosol in Nonphotochemical Smog // Doklady Earth Sciences. 2026. V. 528, 1. DOI: 10.1134/S1028334X25609861.

2. Горчаков Г.И. и др. Черный и коричневый углерод и селективное поглощение радиации дымовым аэрозолем при массовых лесных пожарах на Аляске в 2019 г. и в Канаде в 2023 г. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 01. С. 32–38.

Совместные наблюдения средней атмосферы в Звенигороде и Обнинске с помощью лидарного комплекса АК-3

Иванов В.Н.[1], Коршунов В.А.[1], Чхетиани О.Г.[2], Перминов В.И.[2], Суходоев В.А.[2], Семенов В.А.[2]
[1]*НПО "Тайфун", Обнинск, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
ochkheti@ifaran.ru

Ключевые слова: *средняя и верхняя атмосфера, лидарные измерения*

В 2025 г. завершено размещение на Звенигородской научной станции сетевого лидара АК-3, разработанного НПО «Тайфун» для измерений аэрозоля на высотах от 10 до 70 км и температуры средней атмосферы от 30 до 70 км [1]. В полной комплектности имеется также блок измерений озона от 12 до 35 км [1]. В настоящем варианте измерения озона пока не предусмотрены и планируются на будущее. Аэрозольные и температурные измерения проводятся одновременно на длинах волн 355 и 532 нм.

Установка двух однотипных лидаров в Обнинске и в Звенигороде дает возможность проведения комплексных измерений с разработкой новых методов лидарного зондирования средней атмосферы. Возможные направления совместных исследований включают: изучение пространственно-временных параметров аэрозоля средней атмосферы: совместные измерения температуры атмосферы лидарным методом и методом измерения гидроксильного излучения; образования и эволюции перистых облаков; временных и пространственных масштабов аэрозольно-температурных слоев верхней стратосферы - нижней мезосферы; внутренних гравитационных волн.

Для обработки наблюдений на первом этапе используется программное обеспечение, разработанное в НПО «Тайфун». Лидарная станция в Звенигороде оформлена в тематическом информационно-аналитическом центре НПО «Тайфун» по аналогии с сетевыми лидарными станциями Росгидромета.

Проведены одновременные наблюдения в Звенигороде и Обнинске. Сопоставление полученных высотных профилей аэрозоля показало удовлетворительное количественное соответствие профилей в двух пунктах зондирования. Высотные профили температуры в среднем соответствуют принятой модели. Определенная разница в флуктуациях температуры связана, в основном, с фазовым сдвигом колебаний температуры при распространении внутренних гравитационных волн.

Данные измерений могут быть использованы для мониторинга и диагностики различных процессов в стратосфере и нижней мезосфере. Предлагаем сотрудничество заинтересованным коллегам.

Литература

1. Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коршунов В.А., Сахибгареев Д.Г. Сетевой лидар АК-3 для зондирования средней атмосферы: устройство, методы измерений, результаты // Труды ГГО. – 2020. – Вып. 598. – С. 155-187.

Модельная оценка трансграничного переноса первичных аэрозольных частиц в восточной части России

Ильин И.С.[1], Громов С.А.[1,2], Гусев А.В.[1], Жигачева Е.С.[1]
[1]*Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
i.ilyin@igce.ru

Ключевые слова: *ЕАНЕТ, моделирование, атмосферный перенос, аэрозоль, трансграничный перенос*

В рамках программы ЕАНЕТ осуществлялось моделирование атмосферного переноса и оценки трансграничных вкладов в уровни загрязнения первичными аэрозольными частицами дальневосточных регионов России (Амурская и Сахалинская области, Приморский и Хабаровский края, Еврейская А.О.). Учитывались антропогенные выбросы, ветровой подъём с поверхности суши и моря, а также поступление в атмосферу за счёт природных пожаров. Для расчётов использовалась модель атмосферного переноса загрязняющих веществ GLEMOS. Оценки вкладов в приземные концентрации частиц $PM_{2.5}$ и «крупной» фракции частиц ($PM_{2.5}$ – PM_{10}) получены для пяти субъектов России: Амурской и Сахалинской областей, Приморского и Хабаровского краёв и Еврейской А.О. Вклад в среднегодовые концентрации первичных частиц в воздухе, обусловленный антропогенными источниками, в 2020-ом году варьировался от 11% в Сахалинской области до почти 60% в Еврейской А.О. Вклад российских источников в антропогенную компоненту составляет от 10% (Приморский край) до 35% (Амурская область), что показывает преобладающее влияние трансграничного переноса. Среди неантропогенных источников преобладающий вклад вносили природные пожары (Амурская область, Еврейская А.О., Хабаровский край) и ветровой подъём с поверхности моря (Сахалинская область). Отмечалась сильная сезонная изменчивость вкладов в среднегодовые концентрации. Сравнение рассчитанных концентраций частиц в воздухе с данными измерений на станциях сети ЕАНЕТ продемонстрировало некоторую недооценку моделью измеренных концентраций $PM_{2.5}$, но переоценку крупной фракции частиц.

Исследования выполнялись в рамках темы «Развитие методов и технологий мониторинга и оценки загрязнения природной среды вследствие трансграничного атмосферного переноса загрязняющих веществ и кислотных выпадений (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ; ЕАНЕТ)» плана НИТР Росгидромета, рег. номер 125031703847-1. Оценка данных моделирования сделана в работах по Госзаданию FMWS-2024-0009 №1023032700199-9 Института географии РАН.

Суточная и сезонная динамика эмиссии метана и диоксида углерода из прибрежных болот полуострова Камчатка

Казанцев В.С.[1], Кривенок Л.А.[1], Тананаев Н.И.[2,3,4], Израпил Р.И.[3], Шадрина А.А.[3], Тихонов С.А.[2,3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия*
[3]*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*
[4]*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия*
kazantsev@ifaran.ru

Ключевые слова: *парниковые газы, углеродный баланс, болота, временная изменчивость*

Болотные экосистемы Камчатки остаются неизученными объектами с точки зрения эмиссий парниковых газов. В сентябре 2025 и мае 2026 годов были проведены измерения удельных потоков (УП) CH_4 и CO_2 на прибрежном болоте на востоке полуострова. Измерения проводились методом статических тёмных камер с использованием портативного газоанализатора LI-COR 7810 каждые два часа в течение трёх суток на двух точках, различающихся по растительности и уровню болотных вод.

Осенью два участка с одинаковыми медианными значениями УП метана демонстрировали принципиально разную динамику эмиссии - стабильную диффузию (более сухой участок) и эпизодические «всплески» (влажный участок), что свидетельствует о том, что пространственная неоднородность определяет не только величину потока, но и режим эмиссии. Пиковые значения УП CO_2 были синхронны с пиками УП CH_4, что подтверждает гипотезу о более интенсивной пузырьковой эмиссии на более влажном участке (оба газа выделяются через пузырьки).

В осенних измерениях фиксировался неравномерный характер эмиссии, весной наблюдалась более однородная картина с более низкими общими УП.

На более сухом участке отмечались околонулевые УП CH_4, что указывает на очень низкую микробиологическую активность. На более влажном участке значения УП CH_4 были более изменчивыми с отчетливыми утренними пиками до 3 мг·м$^{-2}$·ч$^{-1}$, возможно, связанными с процессами оттаивания. При этом на данном участке было отчетливо видно образование пузырьков.

Таким образом, заметно, что в случае измерений статическими камерами регулярные измерения в течение полных суток необходимы для точной оценки эмиссий в болотных экосистемах. В случае нашего исследуемого объекта при проведении измерений только в дневное время, завышение оценки суточного потока CH_4 составило бы до 74% для более влажного участка, где наблюдается интенсивная пузырьковая эмиссия. Работа проводилась в рамках программы “Приоритет-2030. Дальний Восток” и ГЗ ИФА РАН № 1024100700065-0-1.5.11.

Недельный цикл, межсуточные вариации и синоптическая изменчивость массовой концентрации черного углерода в воздушном бассейне г. Москвы

Карпов А.В., Горчаков Г.И., Козлов В.С., Степанова Е.В., Гущин Р.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
karpov@ifaran.ru

Ключевые слова: *черный углерод, межсуточная изменчивость, массовая концентрация, синоптическая изменчивость*

По данным непрерывных круглосуточных измерений массовой концентрации черного углерода в атмосферном воздухе центра Москвы (Пыжевский пер.) в 2022 – 2024 гг. построен средний недельный ход за весь период и отдельно для каждого из трех лет. Обнаружены межгодичные вариации недельного хода массовой концентрации черного углерода.
Проведен анализ межсуточных вариаций концентрации черного углерода в период 2022 – 2024 гг. Рассчитаны статистические характеристики среднесуточных значений массовой концентрации черного углерода. Построены эмпирические функции распределения для каждого года и предложены аппроксимирующие логнормальные распределения.
Проанализирована синоптическая изменчивость массовой концентрации черного углерода за рассматриваемый период. Рассчитаны спектры для каждого года и определены максимальные периоды вклада в межсуточную изменчивость массовой концентрации черного углерода: 32, 19 и 24 суток для 2022, 2023 и 2024 гг. соответственно.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием ИФА им. А.М. Обухова РАН FMWR-2025-0007 №1022041800069-7-1.5.9.

Долгопериодная трансформация суточного хода черного углерода и тонкодисперсного аэрозоля в воздушном бассейне г. Москвы

Карпов А.В.[1], Горчаков Г.И.[1], Семутникова Е.Г.[2], Вишняк А.Р.[2], Козлов В.С.[1], Степанова Е.В.[1], Гущин Р.А.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
karpov@ifaran.ru

Ключевые слова: *черный углерод, тонкодисперсный аэрозоль, средний суточный ход, массовая концентрация*

Черный углерод является важным индикатором антропогенного загрязнения городской атмосферы. С 1989 г. по настоящее время на наблюдательном пункте ИФА им. А.М. Обухова РАН (НП ИФА РАН) в центре Москвы (Пыжевский пер.) проводятся регулярные измерения массовой концентрации черного углерода в атмосфере. С 2022 г. измерения проводятся автоматически в круглосуточном режиме с высоким временным разрешением, что позволяет исследовать в том числе внутрисуточную изменчивость концентрации черного углерода.

По данным измерений массовой концентрации черного углерода на НП ИФА РАН и мониторинга массовой концентрации тонкодисперсного аэрозоля $PM_{2.5}$ на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» (Шаболовка и МГУ), был построен среднегодовой средний суточный ход для 2022, 2023 и 2024 гг. Обнаружена сильная межгодичная изменчивость среднегодового суточного хода массовых концентраций черного углерода и тонкодисперсного аэрозоля в период 2022 – 2024 гг.

Показано, что среднегодовой суточный ход массовой концентрации черного углерода на НП ИФА РАН и среднегодовой суточный ход концентрации тонкодисперсного аэрозоля на АСКЗА Шаболовка и МГУ хорошо согласуются друг с другом отдельно для каждого из трех лет [1]. При сопоставлении суточных ходов указанных величин по отдельным сезонам года также обнаружено хорошее согласие. Сделан вывод об общегородских причинах межгодичной изменчивости суточного хода концентраций черного углерода и тонкодисперсного аэрозоля. Предложено рассматривать суточный ход массовой концентрации как характеристику межгодичной изменчивости концентраций наряду с ее среднегодовым значением.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием ИФА им. А.М. Обухова РАН FMWR-2025-0007 №1022041800069-7-1.5.9.

Литература

1. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Семутникова Е.Г., Лезина Е.А., Вишняк А.Р., Степанова Е.В., Козлов В.С., Гущин Р.А., Даценко О.И. Межгодичная изменчивость суточного хода массовой концентрации черного углерода и тонкодисперсного аэрозоля в воздушном бассейне г. Москвы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2026. Т. 530. № 2. С. 423–431.

Влияние метеорологических условий на характеристики вариативности общего содержания монооксида углерода в Московском мегаполисе

Кириллова Н.С.[1], Ракитин В.С.[1], Фёдорова Е.И.[1], Шилкин А.В.[2], Штабкин Ю.А.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*НПО "Тайфун", Обнинск, Россия*
n.kirillova65@gmail.com

Ключевые слова: *монооксид углерода, атмосферная спектроскопия, долговременные тренды, метеорологические условия, мегаполис*

Представлены результаты комплексного анализа долговременных спектроскопических данных общего содержания CO (ОС CO) в Москве (Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, ИФА РАН) и Московской области (Звенигородская научная станция, ЗНС). Проанализированы долговременные вариации ОС CO в толще атмосферы и метеопараметров в пограничном слое атмосферы (ПСА). Выявлено уменьшение среднегодовых величин ОС CO за 2000–2025 гг. для Москвы (–2.06±0.35%/год) и ЗНС (–1.12±0.33%/год). Рассмотрены характеристики трендов CO на обеих станциях в различные сезоны и периоды.

Выполнено исследование эпизодов накопления CO в штилевые солнечные дни. Для анализа дополнительно использовались данные сети «Мосэкомониторинг», траекторный анализ HYSPLIT и орбитальная информация (AIRS и TROPOMI).

После 2008 года темпы снижения ОС CO замедлились на обоих пунктах. Городская часть содержания CO не была зафиксирована ни в одном случае превышения фоновой величины примеси более чем на 50% (кроме природных пожаров 2010 г.). В летне-осенние месяцы на ЗНС в 2009–2023 гг. значимых изменений ОС CO не зафиксировано.

По данным аэрологического зондирования (2003–2020 гг.) установлено возрастание скорости ветра в ПСА г. Долгопрудный (0.91±0.41%/год). В г. Сухиничи статистически значимых изменений скорости ветра не обнаружено (0.06±0.38%/год). В Рязани увеличение скорости ветра в ПСА достигло 0.97±0.41%/год, что почти совпадает с показателями г. Долгопрудный. Также проанализированы сезонные тренды скорости ветра.

Полученные результаты свидетельствуют не только о сокращении антропогенных эмиссий Москвы, но и о влиянии метеорологического фактора на качество воздуха в Московском мегаполисе.

Средняя скорость накопления содержания CO в атмосферной толще в штилевые солнечные дни 2015–2024 гг. составила 4.87±0.30%/час. При длительном штиле в Москве возможно существенное увеличение общего содержания CO (до 50%) и приземных концентраций примеси (до 500%).

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 25-77-31009.

Сравнительный анализ методов обратного траекторного анализа при идентификации источников пылевых выносов в районе Кисловодска

Колесников П.В., Нахаев М.И., Боровский А.Н., Сеник И.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
p.kolesnikov@ifaran.ru

Ключевые слова: *пыльная буря, Кисловодск, обратные траектории, HYSPLIT, FLEXPART*

Определение источников и путей переноса пыли в атмосфере затруднено: спутники фиксируют пыль только в моменты пролёта и не позволяют однозначно установить её происхождение. Для решения этой задачи применяют обратные траектории. В настоящей работе пути переноса пыли к Кисловодску рассчитаны двумя лагранжевыми моделями переноса примесей: траекторной HYSPLIT и дисперсионной FLEXPART. По данным контролируемых выпусков трассера, при одинаковых метеоданных эти модели дают шлейфы сопоставимого качества [1], однако эти эксперименты были проведены на востоке Северной Америки, для горного рельефа Кавказа таких сравнительных оценок нет.

Были выбраны 6 эпизодов 2021-2024 гг. с десятикратным превышением фона по частицам крупнее 1 мкм по данным аэрозольного счётчика ЛАС-П Кисловодской высокогорной научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН. Рассчитаны обратные траектории с помощью моделей HYSPLIT и FLEXPART глубиной 120 ч на основе данных GFS 0,5°. Результаты валидированы на данных реанализа MERRA-2 и измерениях AOT спутником MODIS (алгоритм обработки MAIAC с шагом сетки по горизонтали 1 км).

Модели указывают одинаковое направление переноса: в четырёх эпизодах пыль шла из Сахары через Восточное Средиземноморье, HYSPLIT в отдельные даты добавляет вклад Средней Азии. MERRA-2 подтверждает пыль у станции в пяти эпизодах (85-326 мкг/м^3, в 5-30 раз выше фона), корреляция с часовым рядом ЛАС-П 0,60-0,94. По данным MAIAC, шлейф виден 25.04.2024 и 27.04.2024, 02.04.2022 и 26.04.2024 данных нет из-за облачности, в остальных случаях пыль по MAIAC не выделяется. По вертикали модели расходятся: доля времени в пограничном слое за 120 ч составляет 11–59 % у HYSPLIT и 10–21 % у FLEXPART, причём у HYSPLIT она в 1,8–3,4 раза выше в восьми эпизодах из девяти; модели совпадают только 02.04.2022, когда перенос шёл выше пограничного слоя с медианной высотой около 2,5 км.

Литература

1. Hegarty J., Draxler R.R., Stein A.F., Brioude J., Mountain M., Eluszkiewicz J., Nehrkorn T., Ngan F., Andrews A. Evaluation of Lagrangian particle dispersion models with measurements from controlled tracer releases // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2013. V. 52, № 12. P. 2623–2637. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0125.1.

Обратное моделирование региональных экосистемных потоков CO_2 в Сибири по данным измерений со спутника OCO-2

Коновалов И.Б., Головушкин Н.А.
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
konov@ipfran.ru

Ключевые слова: *природные потоки CO_2, чистый экосистемный обмен, обратное моделирование, OCO-2, химико-транспортная модель*

Поглощение диоксида углерода (CO_2) наземными экосистемами существенно ограничивает рост атмосферной концентрации этого важнейшего парникового газа, что обусловливает высокую потребность в надежных оценках его экосистемных потоков. Одним из важнейших источников наблюдательной информации о поглощении и выделении CO_2 растительностью являются спутниковые измерения усредненной мольной доли CO_2 в столбе атмосферы (XCO_2), которые в настоящее время осуществляются, в частности, со спутника OCO-2. Эффективное использование этой информации обеспечивает методология обратного моделирования.

В данной работе исследовались возможности применения обратного моделирования и данных OCO-2 для изучения экосистемных потоков углерода в крупном сибирском регионе, охватывающем Сибирский федеральный округ. Усовершенствован предложенный ранее [1, 2] метод обратного моделирования экосистемных потоков CO_2 на региональных масштабах, который позволяет уточнять пространственно-временные распределения значений чистого экосистемного обмена путем байесовской оптимизации параметров полуэмпирической модели экосистемного обмена VPRM (Vegetation Photosynthesis and Respiration Model), обеспечивая при этом низкую чувствительность оцениваемых потоков к граничным условиям, задаваемых в транспортной модели. В результате получена оценка интегрального нетто-поглощения CO_2 в изучаемом регионе для исследованного трехлетнего периода (2019-2021 гг.), а также рассчитаны характеристики пространственно-временной изменчивости уточненных экосистемных потоков CO_2 и вызываемых ими вариаций XCO_2. Найдено, что оптимизированные расчеты потоков существенно лучше согласуются с имеющимися данными прямых измерений потоков CO_2 методом турбулентных пульсаций, а также с данными измерений отношения смеси CO_2 с высотной мачты обсерватории ZOTTO. Тем самым полученные результаты указывают на перспективность дальнейшего применения развиваемого метода для мониторинга и контроля вклада российских регионов в атмосферный баланс CO_2.

Литература

1. Коновалов И.Б., Головушкин Н.А., Мареев Е.А. Диагностика регионального углеродного баланса по данным спутниковых измерений диоксида углерода // Доклады РАН. Науки о Земле – 2025 – Т. 523 – № 2. – С. 337-343.
2. Konovalov I.B., Golovushkin N.A., Mareev E.A. Using OCO-2 observations to constrain regional CO2 fluxes estimated with the Vegetation, Photosynthesis and Respiration Model // Remote Sens. – 2025 – V. 17 – P. 177.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Влагонасыщенность тропосферы в зимний период 2026 года в г. Томске

Красненко Н.П.[1,2], Павлинский А.В.[1]
[1]*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*
[2]*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*
wf@inbox.ru

Ключевые слова: *водяной пар, влагосодержание, водосодержание, абсолютная влажность, тропосфера, радиометр водяного пара, температурный профилемер*

Представлены характеристики влагосодержания и водосодержания тропосферы, температурной стратификации и ход приземных параметров атмосферы в январе-марте 2026 г. в Томске. Приведены особенности влажностных характеристик атмосферы при наличии устойчивого антициклона и в период прохождения атмосферных фронтов с осадками.

Данные получены путем радиометрических измерений, выполненных комплексом дистанционного зондирования атмосферы ИМКЭС СО РАН. Комплекс включает в себя радиометр водяного пара, метеорологический температурный профилемер и метеостанцию.

Проведен анализ изменения характеристик атмосферы. Так в январе 2026 года, после установления антициклона и понижения температуры до -36 градусов, зарегистрированы предельно низкие значения интегрального влаго- и водосодержания в атмосфере. При этом величина приземной абсолютной влажности в указанный период характеризуется изменчивостью и ее колебания не коррелируют с изменениями влагосодержания атмосферы и радиояркостной температуры в каналах радиометра. Фиксируется наличие температурных инверсий в пограничном слое атмосферы во время аномального похолодания и прихода теплых воздушных масс.

В начале февраля отмечалось потепление и осадки в виде снега, затем с 20 февраля началось похолодание до –30 градусов. В этот период также зафиксировано низкое влаго- и водосодержание атмосферы, при этом уже с 15 февраля приземная абсолютная влажность остается стабильно низкой, утрачивает корреляцию с температурой воздуха и прослеживается ее суточный ход, чего не отмечалось в холодный период января.

После потепления в первой декаде марта показания влаго- и водосодержания возвращаются к своему обычному виду, характеризующемуся быстрой изменчивостью. Прослеживаются помехи (выбросы), вызванные попаданием осадков на приёмное зеркало радиометра. Абсолютная приземная влажность показывает корреляцию с температурой воздуха, при этом ее связи с влагосодержанием атмосферы не прослеживается.

Поглощение метана почвами южной тундры Западной Сибири: суточная и пространственная изменчивость

Кривенок Л.А.[1], Гаврилов Г.О.[1], Устинов Н.Б.[1], Ларина А.В.[1], Швец М.С.[1], Никитин Д.А.[2], Цветнова Е.А.[1], Сабреков А.Ф.[3], Казанцев В.С.[1]

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

[2]*Институт почвоведения им. В.В. Докучаева РАН, Москва, Россия*

[3]*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

krivenok@ifaran.ru

Ключевые слова: *парниковые газы, цикл углерода, потребление метана, статические камеры*

Поглощение метана дренированными тундровыми почвами остаётся слабо изученным, особенно в южной тундре Западной Сибири, где они занимают обширные площади. Недостаток полевых данных может приводить к систематической недооценке стока метана в почвах и снижать точность оценок региональных эмиссий парниковых газов. В работе представлены результаты полевой кампании 2026 г. в Пур-Тазовском междуречье.

Для оценки суточных и пространственных закономерностей поглощения метана мы измеряли удельные потоки (УП) на двух участках: МЯ, представляющем преобладающий тип сухой тундры в районе исследований, и МТ, отличающемся по занимаемым площадям и составу растительности. На каждом участке выбрано по пять точек вдоль катены, от вершины склона к его основанию. Использовались тёмные статические камеры с газоанализатором LI-COR 7810; измерения проводились в течение трех полных суток на каждой катене.

Обе изученные катены выступали слабым стоком метана: УП варьировали от близких к нулю до -0,1 мг$CH_4 \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$. Поглощение метана усиливалось вниз по склону на обеих катенах, при этом наибольшее поглощение стабильно наблюдалось в самой нижней точке. Этот пространственный паттерн подтвержден кластерным анализом методом Уорда: большинство изученных точек попало в один кластер с близким к нулю УП метана, тогда как точки нижней части склона образовали отдельные кластеры. Суточные закономерности выражены: наиболее сильное поглощение происходило в вечерние и ночные часы, дневные УП были близки к нулю или слабо положительными. Участки показали сходные качественные закономерности поглощения метана, при этом МТ в среднем выступал удельным стоком примерно в 3-5 раз более сильным (в зависимости от способа усреднения), чем МЯ.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 26-17-00381.

Дневное фотохимическое равновесие полных концентраций семейств Ox и HOx на высотах стратосферы и мезосферы

Куликов М.Ю., Чубаров А.Г., Беликович М.В., Дементьева С.О., Фейгин А.М.
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
kulm@ipfran.ru

Ключевые слова: *стратосфера, мезосфера, озон*

В данной работе результаты расчёта глобальной годовой эволюции стратосферы и мезосферы, полученные с помощью трёхмерной химико-транспортной модели всей атмосферы WACCM-X, применены для исследования выполнимости фотохимического равновесия семейств нечётного кислорода (O_x=O+O_3) и нечётного водорода (HO_x=H+OH+HO_2) в зависимости от времени и координат. Установлено, что в каждом месяце существуют обширные высотно-широтные области, в частности, простирающиеся от высот стратосферы до 80 км, в которых полные концентрации данных семейств в дневное время эволюционируют вблизи своих мгновенно-равновесных значений. Выполнен детальный анализ относительного вклада различных фотохимических источников и стоков в найденных областях равновесия. Показано, что основной вклад в уравнения химической кинетики для каждого семейства вносят сравнительно небольшое число двух- и трехмолекулярных реакций. Применение алгебраических соотношений, следующих из условий равновесия O_x и HO_x, к данным спутникового или наземного зондирования открывает широкий спектр возможностей для создания новых методов восстановления неизмеряемых (плохо измеряемых) характеристик средней атмосферы, уточнения констант фотохимических реакций или валидации самих экспериментальных данных. Для реализации таких подходов разработаны простые и удобные для практического использования аналитические критерии, позволяющие определять выполнение равновесий Ox и HOx непосредственно по самим данным измерений.
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-17-00200, https://rscf.ru/project/26-17-00200/

Оценка эмиссии CH_4 с поверхности хасырея (осушенной котловины термокарстового озера) по результатам полевых исследований в южной тундре Западной Сибири

Ларина А.В., Гаврилов Г.О., Казанцев В.С.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
larin.arina2003@gmail.com

Ключевые слова: *деградация ММП, многолетнемерзлые породы*

Динамика криосферы в значительной мере обусловлена климатическим фактором. Современное изменение климата, вызывающее наиболее быстрый рост температуры в Арктике, влечет деградацию компонентов криосферы в регионе. Одно из проявлений динамики многолетнемерзлых пород — осушение термокарстовых озер с образованием высокопродуктивных экосистем, хасыреев.

Для исследования нами был выбран участок Пур-Тазовского междуречья в южнотундровой подзоне Западной Сибири. По результатам сравнения данных спутниковых снимков 1999 и 2019 гг. выявлено снижение площади озер на участке более чем на 10%.

В июле–августе 2025 и 2026 гг. нами была измерена суточная динамики эмиссии CH_4 с поверхности наиболее типичных компонентов микроландшафта хасырея Ярнето. Исследование проведено при среднесуточных температурах воздуха от 9.7 до 22.5 °C. Это позволило выявить экспоненциальную связь среднесуточной температуры воздуха с величиной суточной эмиссии CH_4 (R^2 = 0.65–0.95).

Основываясь на определении площади компонентов микроландшафта и среднесуточной температуре каждого дня, произведена оценка эмиссии CH_4 с поверхности всего хасырея в июле–августе 2025 и 2026 гг. Выявлено, что источником более чем 50% величины эмиссии CH_4 служит молодая (осушенная в последние десятилетия) ступень хасырея, и 7% — озеро. Оцененная суммарная эмиссия CH_4 с поверхности хасырея в исследуемый период составила 1.3 ± 0.1 т $CH_4 \cdot км^{-2} \cdot мес^{-1}$ при средней температуре 14.4 °C (2025); и 1.7 ± 0.1 т $CH_4 \cdot км^{-2} \cdot мес^{-1}$ при средней температуре 17.3 °C (2026).

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФА РАН № 1024100700065-0-1.5.11.

Оценка воздействия автотранспортной сети Москвы на качество атмосферного воздуха в условиях изменяющегося климата

Лысова О.В.[1,2], Матешева А.В.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Российский университет транспорта, Москва, Россия*
lov1998@yandex.ru

Ключевые слова: *автомобильный транспорт, загрязнение атмосферного воздуха, Москва, изменение климата*

Проводится исследование воздействия выбросов автотранспортной сети Москвы на качество атмосферного воздуха в условиях изменяющегося климата с целью оценки ожидаемой динамики загрязнения к 2050 г. Получены сценарные оценки среднемесячных концентраций оксида углерода (CO), для января и июля 2024 и 2050 гг. с учетом трех вариантов развития транспортной системы города и климатических сценариев Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Расчеты выполнены на основе оценки автотранспортных выбросов по участкам улично-дорожной сети и моделирования переноса примесей с применением мезомасштабной модели Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem). Рассмотрены оптимистичный, базовый и пессимистичный транспортные сценарии, различающиеся уровнем автомобилизации, структурой автопарка, долей экологически чистого транспорта и интенсивностью движения.

Показано, что в 2024 г. среднемесячные концентрации загрязняющих веществ, содержащиеся в выбросах от автотранспорта, не превышают установленные предельно допустимые значения. К 2050 г. наиболее благоприятная картина ожидается при сочетании оптимистичного транспортного сценария и мягких климатических изменений. Ухудшения качества атмосферного воздуха ожидаются при росте автотранспортных выбросов на фоне выраженных климатических изменений. Полученные результаты показывают, что развитие экологически ориентированной транспортной политики является ключевым условием снижения загрязнения атмосферы Москвы, а климатические изменения способны усиливать или ослаблять эффект принимаемых мер.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФА РАН (тема FMWR-2025-0001, проект № 1022041300341-3-1.5.10) при частичной поддержке программы «Приоритет-2030» (СТП № 1 РУТ (МИИТ)) и гос. задания от 15.01.2026 № 103-00001-26-00.

Пространственно-временная изменчивость аномалий потоков CO_2 и CH_4 в тропических наземных экосистемах на различные типы Эль-Ниньо и Ла-Нинья

Масляшова А.О., Гущина Д.Ю., Ольчев А.В.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
amas101001@mail.ru

Ключевые слова: *Эль-Ниньо, Ла-Нинья, ЭНЮК, аномалии потоков CO_2 и CH_4, тропические экосистемы, углеродный цикл*

Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) — важный источник межгодовой изменчивости климата тропиков. Связанные с ним изменения температуры и осадков влияют на экосистемы и обмен парниковыми газами между сушей и атмосферой. Цель работы — выявить пространственно-временные особенности потоков CO_2 и CH_4 при восточно- и центрально-тихоокеанском Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Для анализа были использованы среднемесячные поля потоков CO_2 и CH_4 из архива Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) и данные реанализа ERA5. Пространственные закономерности отклика оценивались с помощью линейного регрессионного анализа, композиционных карт аномалий и кросс-корреляционного анализа с временными задержками.

Отклик аномалий потоков CO_2 прослеживается в Южной Америке, Африке, Индонезии и Австралии. Наиболее интенсивные аномалии связаны с восточно-тихоокеанским Эль-Ниньо; при центрально-тихоокеанских событиях площадь отклика меньше. В ряде регионов положительные аномалии CO_2 совпадают с повышением температуры и дефицитом осадков, указывая на ослабление поглощения и/или усиление нетто-выделения газа.

Отклик аномалий потоков CH_4 более неоднороден. Единого распределения аномалий при Эль-Ниньо не выявлено, тогда как при Ла-Нинья положительные аномалии в отдельных районах Южной Америки и Азии повторяются регулярнее.

Кросс-корреляционный анализ выявил запаздывание отклика CO_2: в восточной части Южной Америки значимые связи сохраняются до 18 месяцев после кульминации восточно-тихоокеанского Эль-Ниньо; продолжительные связи обнаружены и в отдельных районах Индонезии.

Таким образом, отклик потоков CO_2 и CH_4 на ЭНЮК существенно различается по пространственной структуре и временным характеристикам. Полученные результаты показывают необходимость учитывать тип события ЭНЮК, региональные гидротермические условия и временные задержки реакции экосистем при моделировании углеродного цикла и климатической системы Земли.

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова при поддержке Российского научного фонда (проект № 26-17-00088).

Исследование влияния дальнего переноса на тенденции риска для растительных экосистем биосферных заповедников северных территорий РФ от загрязнения атмосферы в 1981–2070 гг.

Матешева А.В.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Российский университет транспорта, Москва, Россия*
matesheva@ifaran.ru

Ключевые слова: *загрязнение атмосферы, перенос примесей, изменение климата, риск, растения, заповедники*

Исследована динамика риска для наземных и водных экосистем биосферных заповедников северных территорий РФ (Лапландского, Печоро-Илычского, Центральносибирского, Таймырского) от дальнего загрязнения атмосферы SO2 потенциальными источниками в 1981–2070 гг. с точки зрения влияния погодно-климатических факторов по сценариям изменения климата SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Исследование выполнено на основе методологии оценки риска от загрязнения окружающей среды U.S. EPA. Оценка концентрации примеси базируется на решении сопряженного уравнения переноса и диффузии примеси.

За прошедший период до 2026 г. показана общая тенденция к снижению риска, наиболее выраженная для заповедников на севере ЕЧР и в центре Средней Сибири (тренд 10–20 %). На Таймыре динамика риска несущественна. Исследование будущих трендов в отдельные периоды показало значимое повышение риска (порядка 15–20 %) для Лапландского заповедника (при сценарии SSP5-8.5) и арктического участка Таймырского заповедника (при сценарии SSP2-4.5). При других сценариях, а также для других заповедников вариации риска не столь существенны, при этом характеризуются разнонаправленными трендами. Отмеченные особенности динамики риска обусловлены вариациями общей циркуляции атмосферы из-за изменений климата и территориальной неоднородностью климатических изменений.

Полученные результаты указывают на необходимость усиления внимания к заповедникам АЗРФ ввиду их повышенной уязвимости, а также к мощным источникам эмиссии, расположенным южнее, вследствие их возможного влияния на данные заповедники при дальнем атмосферном переносе. Результаты работы актуальны при планировании пространственного развития.

Работа выполнена при поддержке гос. задания ИФА РАН (тема FMWR-2025-0001, проект № 1022041300341-3-1.5.10), гос. задания от 15.01.2026 № 103-00001-26-00, программы «Приоритет-2030» (СТП № 1 РУТ (МИИТ)).

Отклик мезосферного озона на солнечные и геомагнитные возмущения

Миронова И.А., Доронин Г.Г.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
i.a.mironova@spbu.ru

Ключевые слова: *мезосферный озон, озон-разрушающих компонент атмосферы, солнечные и геомагнитные возмущения*

Высыпания энергичных частиц, вызванные корональными выбросами массы и геомагнитными бурями играют важную роль в процессах протекающих в верхней и средней атмосфере, включая ионизацию, возбуждение, диссоциацию и рекомбинацию, а также последующие химические реакции. Способность энергичных частиц эпизодически усиливать ионизацию полярной атмосферы Земли приводит к образованию нечетных форм водорода ($HO_x = H + OH + HO_2$) и азота ($NO_x = N + NO + NO_2$). HO_x и NO_x играют ключевую роль в балансе озона, запуская эффективные каталитические циклы его разрушения в верхней атмосфере высоких широт обоих полушарий.

В 2024-2026 годах произошел ряд мощных солнечных извержений, вызвавших серию сильных геомагнитных возмущений — в частности, в мае и октябре 2024 года, в ноябре 2025, а также в январе 2026 года.

Прибор MLS (Microwave Limb Sounder) на борту спутника Aura обеспечивает одновременные измерения концентраций химических компонентов в диапазоне от верхней тропосферы до мезосферы, что позволяет детально исследовать влияние высыпания энергичных частиц на состав атмосферы.

Оценки образования озон-разрушающих компонентов атмосферы и разрушения мезосферного озона будут даны во время геомагнитных возмущений и солнечных эруптивных событий на основе наблюдений со спутника MLS (данные по озону, HO_2 и HNO_3). В докладе предполагается показать последние результаты по исследованию отклика высокоширотной атмосферы на высыпания энергичных частиц (электронов и протонов) во время солнечных и геомагнитных возмущений 2024, 2025 и 2026 гг.

В качестве заключения, на основе данного исследования, делается прогноз изменения озон-разрушающих компонент атмосферы и разрушения мезосферного озона в зависимости от экстремальных событий космической погоды.

Работа выполнена в рамках государственного задания СПбГУ № 124032000025-1.

Применение кластерного анализа для футпринтов углеродсодержащего аэрозоля в центральной Сибири

Михайлова А.С., Власенко С.С., Михайлов Е.Ф.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
st075797@student.spbu.ru

Ключевые слова: *элементарный углерод, органический углерод, FLEXPART*

Углеродсодержащий аэрозоль (элементарный, EC; и органический, OC) играет одну из ключевых ролей в радиационном балансе атмосферы и региональном климате. Для региона центральной Сибири характерны высокие уровни эмиссий от лесных пожаров, на фоне которых сложнее идентифицировать антропогенные источники и их пространственную структуру.

В работе использованы данные измерений концентраций EC и OC со станции Зотино (60°47′ с. ш., 89°21′ в. д.) за период 2010–2023 гг. Для расчета футпринтов была использована лагранжева дисперсионная модель атмосферного переноса FLEXPART в обратном режиме. В качестве входных метеорологических полей использовались данные FNL (NCEP Final Analysis). Вычислительная сетка 50–70° с. ш. × 80–100° в. д. взята с пространственным разрешением 0,25°, временное разрешение моделирования - 1 час. К рассчитанным полям функции чувствительности (футпринтам) был применен метод кластеризации HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise).

Кластеризация позволила выделить устойчивые типы синоптических ситуаций и траекторий переноса, соответствующие различным сценариям поступления воздушных масс. Для каждого кластера проведена оценка средних концентраций EC и OC, что дает представление о вкладе потенциальных источников в общие массовые концентрации. Предложенный подход позволяет выделить слабо интенсивные источники углеродсодержащего аэрозоля на фоне маскирующего вклада лесных пожаров, а также оценить их сезонные особенности.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки № 075-15-2024-661.

Литература

1. Bakels L., Tatsii D., Tipka A. et al. FLEXPART version 11: improved accuracy, efficiency, and flexibility // Geosci. Model Dev. 2024. Vol. 17. P. 7595–7627.
2. Campello R. J. G. B., Moulavi D., Sander J. Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates // PAKDD 2013. LNCS. Berlin: Springer, 2013. Vol. 7819. P. 160–172.

Сезонная динамика и вертикальная структура атмосферного переноса промышленных выбросов в воздушный бассейн озера Байкал

Моложникова Е.В., Тюрнев И.Н., Шиховцев М.Ю.
Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия
yelka75@yandex.ru

Ключевые слова: *озеро Байкал, атмосферный перенос примесей, сезонная динамика переноса, индекс потенциала атмосферного загрязнения*

В работе проведена количественная оценка прямого атмосферного переноса выбросов от трех групп источников (Иркутская агломерация, Республика Бурятия, нефтегазодобывающие районы Иркутской области) в воздушный бассейн озера с использованием модели HYSPLIT (2005-2025 гг.). Рассчитано 4,7 млн траекторий на высотах 250, 500 и 1000 м.

Установлена выраженная неоднородность атмосферной нагрузки. Иркутская агломерация формирует устойчивый перенос в Южную котловину (до 66,4% зимой). Источники Республики Бурятия в основном оказывают нагрузку на Центральную котловину (в среднем 18,8 %). Впервые показано, что нефтегазодобывающие районы Иркутской области могут создавать риск загрязнения атмосферы Северной котловины (до 20,5%).

Характер переноса примесей над акваторией озера Байкал определяется синоптическими процессами. Зимой доминирует С-З перенос воздушных масс, обусловленный антициклонической циркуляцией. Летом увеличивается доля локальной циркуляции и переноса с Ю-В направления. Анализ межгодовой изменчивости (Манна-Кендалла) не выявил статистически значимых трендов в направлениях переноса, но зафиксировал повышенную изменчивость в аномальные годы. Это коррелирует с усилением циклонической активности и ослаблением Азиатского антициклона. Отсутствие значимых трендов указывает на стабильность крупномасштабных циркуляционных механизмов, и позволяет использовать среднемноголетние характеристики для долгосрочного прогнозирования экологических рисков и планирования мониторинга.

На основе проведенных расчетов разработан и апробирован индекс потенциала атмосферного загрязнения (PI). PI включает объем выбросов, вероятностные характеристики доставки загрязняющих веществ к акватории, продолжительность контакта, коэффициент эффективности осаждения. Построенные карты PI визуализируют пространственное распределение атмосферной нагрузки и обосновывают дифференцированный подход к мониторингу с учётом сезонно-высотной динамики пограничного слоя.

Работа выполнена по гранту РНФ № 25-27-00653.

Влияние солнечной радиации, температуры и влажности воздуха на концентрацию тропосферного озона в Центральной Якутии

Мордовской П.Г., Старостин Е.В.
ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Якутск, Россия
mordovskoipg@yandex.ru

Ключевые слова: *мониторинг, озон, низкие температуры*

В работе представлены результаты непрерывного мониторинга концентраций приземного озона и оксидов азота в фоновых условиях Центральной Якутии (научная станция «Спасская Падь») за период 2022-2026 гг. Анализ выполнен на основе данных газоаналитического оборудования с учетом метеорологических параметров и интенсивности солнечной радиации (MERRA-2). Установлено, что на фоне стабильно низких концентраций NO_x наблюдаются повышенные уровни озона. Выявлена устойчивая суточная динамика с дневным максимумом и ночным минимумом во все сезоны. Определены два принципиально разных температурно-химических режима: летний, характеризующийся интенсивным фотохимическим образованием озона при высокой инсоляции, и зимний, при котором в условиях температурных инверсий и дефицита света доминирует реакция химического разрушения озона. Обнаружена нелинейная зависимость концентрации озона от относительной влажности: отрицательная корреляция при температурах выше –20°C (обусловленная влиянием облачности на радиацию) сменяется положительной связью в условиях экстремальных морозов (< –20°C), физический механизм которой требует дальнейшего изучения.

Оценка влияния транспортной нагрузки на загрязнение воздуха Кисловодска по результатам численного моделирования

Нахаев М.И.[1], Габидуллина С.В.[2], Голиков А.Д.[3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия; Лаборатория моделирования средней и верхней атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Гидрометцентр России, Москва, Россия*
sveta1j64@gmail.com

Ключевые слова: *Кисловодск, качество воздуха, химическая транспортная модель CHIMERE, WRF, транспортная нагрузка, сценарии эмиссий, CO, NO_x*

Кисловодск – рекреационная зона федерального значения, поэтому качество воздуха в нем особенно важно. Рост туристического потока увеличивает транспортную нагрузку, а вклад сложного рельефа в уровень загрязнения CO на большей части расчетной области оценивается в 20–50 % [1].

С помощью модели CHIMERE v2023r3, совмещенной с WRF в онлайн-режиме [2], на трех вложенных сетках (51×51 узел, шаг 25, 5 и 1 км; эмиссии EMEP) выполнены расчеты для января и июля 2020–2024 гг. в трех сценариях: контрольном, при увеличении плотности дорожной сети (эмиссии ×2) и при ограничении использования транспорта с экологическим классом ниже Евро-4 (эмиссии ×0,6 [3]). Анализировались приземные концентрации CO, NO_x в центре города. Удвоение эмиссий приводит к росту средних концентраций CO на 28–32 %, NO_x – на 34–35 %; знак эффекта устойчив во все пять лет. Ограничение снижает концентрации CO на 18 %, NO_x – на 17–24 %. Пики реагируют сильнее средних: летом 95-й перцентиль CO растет на 51 %, среднее – на 28 %. В январе ночью концентрации CO и NO_x выше дневных на 13 и 32 %, избыток сосредоточен в нижнем 120-метровом слое, отклик на удвоение эмиссий сильнее (CO +36 % против +25 % днем). Таким образом, эффект роста транспортной нагрузки сильнее всего проявляется в эпизодах высокого загрязнения, а ограничение частично его компенсирует.

Различие среднесуточных концентраций между выходными и буднями в модели не превышает 3 %. Отметим, что перераспределение эмиссий HTAP с учетом плотности дорожной сети и ее суточной и недельной динамики повысило корреляцию модельных и измеренных на ВНС ИФА РАН концентраций CO с 0,20 до 0,88 и уменьшило смещение с −54 до −15 ppb [1].

Литература

1. Нахаев М.И., Семенов В.А., Чернокульский А.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Артамонов А.Ю. Особенности моделирования загрязнения атмосферы монооксидом углерода в г. Кисловодске: влияние орографии и коррекции эмиссий автотранспорта // Оптика атмосферы и океана. 2026. Т. 39, № 3. С. 229–239.
2. Menut L. et al. // Geosci. Model Dev. 2021. V. 14. P. 6781–6811.
3. Directive 98/69/EC of the European Parliament and of the Council // Off. J. Eur. Communities. 1998. L 350. P. 1.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Идентификация источников аэрозольного загрязнения г. Москва по данным элементного состава и морфологии твердых частиц с применением факторного анализа

Ногачева А.И., Колесников Е.А., Таскина А.А.
Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Россия
m2213624@edu.misis.ru

Ключевые слова: *атмосферный аэрозоль, $PM_{2.5}/PM_{10}$, элементный состав, морфология частиц, метод главных компонент, загрязнение, Москва*

Загрязнение атмосферного воздуха твёрдыми аэрозольными частицами является значимой экологической проблемой крупных городов. Автомобильные дороги представляют особый интерес как участки совместного воздействия выбросов транспорта, износа дорожного покрытия и тормозных систем, а также ресуспензии ранее осевшей пыли. При этом придорожный аэрозоль включает частицы различного происхождения, а их концентрационные характеристики сами по себе не позволяют установить вклад отдельных источников. Элементный состав и морфология частиц обеспечивают дополнительные диагностические признаки, позволяющие различать минеральную составляющую, продукты механического износа и техногенные примеси. Установление таких закономерностей необходимо для интерпретации пространственной неоднородности аэрозольного загрязнения и оценки факторов, формирующих состав городской атмосферы [1].

Исследованы пробы, отобранные вблизи крупных автомобильных магистралей Москвы. Морфологические характеристики и элементный состав частиц определяли методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Для выявления элементных взаимосвязей и предварительной интерпретации возможных источников применяли метод главных компонент.

Факторный анализ показал, что первые четыре главные компоненты объясняют более 63 % дисперсии данных. Выявленные элементные ассоциации (Si–Al; Na–Cl; Ba–S) рассматриваются как маркеры возможных источников — минеральной пыли, реагентов и техногенных выбросов. Микроскопия дорожных проб выявила пластинчатые шероховатые минеральные частицы (агрегаты 2–10 мкм, отдельные частицы 0,1–1 мкм), а в зонах интенсивного движения — сферические металлсодержащие частицы (Fe, Zn, Cu) [2].

Полученные данные подтверждают многокомпонентный характер придорожного загрязнения и позволяют оценить вклад автотранспорта и сопутствующих источников в формирование качества воздуха городской среды.

Литература

1 Hinds W.C., Zhu Y. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles // New York, Wiley-Interscience. – 2022. – 482 p.

2 Vlasov D. V., Kosheleva N. E., Kasimov N. S. Spatial Distribution and Sources of Potentially Toxic Elements in Road Dust and its PM_{10} Fraction of Moscow Megacity // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 761. Art. 143267.

Исследование изменчивости концентрации атмосферного метана в Арктике по данным морских измерений летом 2024 г.

Панкратова Н.В.[1], Васильева А.В.[1], Беликов И.Б.[1], Белоусов В.А.[1], Муравья В.О.[1,2], Скороход А.И.[1,3], Штабкин Ю.А.[1], Кравчишина М.Д.[2], Флинт М.В.[2]

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

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

[3]*Университет Вены, Вена, Австрия*

pankratova@ifaran.ru

Ключевые слова: *Арктика, метан в атмосфере, эмиссии метана, стабильный изотоп, морские измерения*

Проанализированы данные непрерывных измерений концентраций CH_4, CO_2, $\delta^{13}C$ и O_3, полученные в экспедициях 2024 г. с борта научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш»: с 23 июня по 23 июля (рейс 95) и с 25 июля по 30 августа (рейс 96). Исследование сфокусировано на выявлении локальных и региональных источников CH_4, а также на оценке вклада различных источников — антропогенных, болотных и океанических — в наблюдаемые концентрации CH_4.

Количественные оценки вклада источников CH_4 в наблюдаемые концентрации получены с помощью модели, описанной в [1]. Модель связывает поле эмиссий с концентрациями в точках наблюдений посредством дискретной функции вклада источников χCH_4 на широтно-долготной сетке с размером ячейки 0,5 × 0,5°, равной концентрации примеси в точке измерений вследствие эмиссий от источников в ячейке. Сумма значений χCH_4 по всем ячейкам сетки даёт оценку суммарного вклада наветренных эмиссий в наблюдаемые концентрации при времени переноса до пяти суток.

Применённый метод хорошо различает антропогенные и болотные эмиссии. Антропогенные эмиссии характеризуются одновременным ростом концентраций CO_2 и CH_4, тогда как болотные приводят к повышению только концентрации CH_4. При этом выявить исключительно антропогенные источники CH_4 не удалось: в окружающем воздухе всегда присутствовал вклад природных источников, как правило болот. Получено, что преобладающий вклад в формирование поля концентраций CH_4 вносили болота: 84 % в рейсе 95 и 70 % в рейсе 96. Этот результат также подтверждается диаграммой Килинга [2, 3]. Согласно оценкам, значение $\delta^{13}C$, характерное для эмиссии CH_4 из болот севера Европейской России, составляет -78 ± 3 ‰.

Впервые результаты моделирования продемонстрировали существенное влияние подводного CH_4 на формирование продолжительных атмосферных максимумов концентрации CH_4. Средний вклад океанических источников CH_4 в наблюдаемые вдоль трассы судна концентрации составил чуть более 10 %.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-27-00140).

Литература

1. Панкратова Н. В. и др. Концентрация метана в атмосфере над морями западного сектора российской Арктики в позднеосенний сезон в 2023 году // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2025. Т 61. № 6. С. 117–134. DOI: 10.7868/S3034648725060082

2. Pataki D. E., et al. The application and interpretation of Keeling plots in terrestrial carbon cycle research // GBC. 2003. V. 17. N. 1. P. 1022.

3. Fisher R. E., et al. Arctic methane sources: Isotopic evidence for atmospheric inputs // GRL. 2011. 38. L21803

Потоки CO_2 в системе «атмосфера-вода» в теплый период года в пелагиали оз. Байкал

Панченко М.В.[1], Пестунов Д.А.[1], Домышева В.М.[2], Иванов В.Г.[2], Шамрин А.М.[1]
[1]*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*
[2]*Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия*
pmv@iao.ru

Ключевые слова: *углекислый газ, метан, газообмен, атмосфера, водная поверхность, Байкал, потоки, климатические модели*

Внушительные размеры озера Байкал и наличие его уникальной биоты определяют актуальность изучения процесса обмена углеродосодержащих газов между атмосферой и водной поверхностью. В докладе впервые на основе результатов измерений парциального давления углекислого газа и метана в системе «вода-атмосфера», полученных в 3 судовых экспедициях, проведенных в теплый период года по всей акватории Байкала обсуждается оценка потоков CO_2. Для того чтобы более корректно оценить баланс потоков только по атмосферному каналу, расчеты были проведены для пространства озера с глубинами свыше 200 метров (пелагиаль 200м-около 82% от всей площади акватории). Описание судового газоаналитического комплекса для непрерывных измерений по ходу судна парциальных давлений углекислого газа и метана в поверхностной воде и приводной атмосфере ранее были опубликованы в ряде наших статей (см.напр.[1]). В докладе анализируются потоки углекислого газа, которые определялись по разности парциальных давлений углекислого газа между атмосферой и водной поверхностью при среднем значении скорости ветра 4.5 м/с. [2]. Расчет суммарных потоков CO_2 только за периоды измерений показал: в июне за 13 суток поток в атмосферу составил около ~ (+15 килотонн), в июле за 15 суток наблюдался сток в воду ~ (-170 кт) и в сентябре за 15 суток сток ~ (-110 кт). Оценка суммарного потока за весь период (июнь-сентябрь) была проведена методом линейной интерполяции, которая показала, что за это время на поверхность озера из атмосферы уходит около 800 000 тонн CO_2, что компенсирует годовой выброс примерно 200-250 тысяч автомобилей (см. напр. [3]). Отметим, что эти результаты были получены впервые и полагаем, что учет столь значительной величины удаления из атмосферы одного из важных парниковых газов необходим в региональных климатических моделях.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий ИОА СО РАН (FWRU-2026-0005 №126020216335-5) и ЛИН СО РАН (FWSR-2026-0015 №1025032400008-1-1.5.12)

Литература

1. Пестунов Д. А. и др. Пространственное распределение направления потоков CO2 и CH4 по акватории озера Байкал (кругобайкальская экспедиция, июнь 2013 г.) // Оптика атмосферы и океана. - 2015. т. 28. №9. - С.792-799.
2. Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited// Limnology and Oceanography:Methods. 2014 V.12, № 6. 351–362
3. Милякин С. Р. Снижение выбросов CO2 в городах: электромобили или общественный транспорт // ЭКО. 2022. № 12. С. 32–51.

Изучение переноса аэрозольного загрязнения в окрестностях г. Апатиты по данным измерений и вихреразрешающего моделирования

Петров Н.А.[1,2], Дебольский А.В.[1,3], Мортиков Е.В.[1], Васенев В.И.[4], Окунева В.В.[1]
[1]*Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия*
[3]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[4]*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*
nial.03@mail.ru

Ключевые слова: *пылевой аэрозоль, эмиссия, вихреразрешающее моделирование, MSU-LES, АНОФ-2, хвостохранилище*

Основой промышленного производства в г. Апатиты является первичное обогащение апатито-нефелиновых руд, в результате которого отходы производства захораниваются в места хвостохранилищ. При определённой совокупности метеорологических условий, на хвостохранилищах наблюдается интенсивная эмиссия пылевого аэрозоля и его перенос в сторону г. Апатиты. В эти периоды происходит резкое увеличение концентрации пылевых аэрозолей в городе, что приводит к ухудшению экологической обстановки.

В данной работе исследуются характерные эпизоды переноса аэрозольного загрязнения от крупного хвостохранилища (АНОФ-2) в окрестности г. Апатиты на основе анализа данных городских измерений сети РУДН и вихреразрешающего моделирования с использованием модели MSU-LES [Glazunov et al., 2025]. По данным измерений были выявлены и оценены эпизоды повышения концентрации аэрозолей в городе за счёт переноса пылевых частиц от хвостохранилищ. Начальные и граничные условия для моделирования в MSU-LES взяты из реанализа ERA-5 [Hersbach et al., 2020], параметризация эмиссии задана по работе от скорости ветра, перенос аэрозоля рассматривается в виде пассивной примеси с учётом сухого осаждения и седиментации. Численные эксперименты были реализованы на большом домене, включающем город и хвостохранилище АНОФ-2, а также на вложенном домене, который явно учитывает городскую застройку.

Данное исследование важно для разработки эффективных методов контроля качества окружающей среды в г. Апатиты и в других промышленных городах Арктики.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение №075-15-2026-229.

Литература

1. A. V. Glazunov, E. V. Mortikov, A. V. Debolskiy, A. D. Pashkin. Large eddy simulation in the urban environment with simplified and realistic surface morphology // Russian Meteorology and Hydrology. — 2025. — Vol. 50, no. 6. — P. 491–506.
2. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al. The ERA5 global reanalysis. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2020. — Vol. 146, no. 730. — P. 1999–2049. DOI 10.1002/qj.3803.

Турбулентная термодиффузия - механизм атмосферного переноса нуклеиновых биопримесей

Рагульская М.[1], Скобликов Н.[2], Клиорин Н.[1]
[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия*
[2]*Краснодарский научный центр по зоотехнии и ветеринарии, Краснодар, Россия*
ra_mary@mail.ru

Ключевые слова: *турбулентная термодиффузия, атмосферный перенос биопримесей, тропопауза, солнечная активность, космические лучи*

Механизм круговорота и мутаций аэропланктона в атмосфере, связанный с циклами солнечной активности (СА) и космических лучей (КЛ), рассмотрен в [1]. Механизм объясняет возникновение мутаций, атмосферного распространения вирусных пандемий, а также периодику возникновения новых штаммов вирусов во время эпидемий, которые находятся в противофазе с динамикой СА (Рагульская М.). В минимумах СА основной биотропный фактор - КЛ. КЛ активно влияют на биологические объекты, но из-за защитной функции атмосферы до поверхности Земли КЛ доходят ослабленными и переизлученными. Однако при подъеме на высоту биоэффективность ГКЛ существенно возрастает: в 10 раз на высоте 5 км, и на 2 порядка на высоте 11 км. В разреженной атмосфере происходит активная бомбардировка аэропланктона КЛ, рентгеновским и УФ-излучением Солнца, что приводит к процессам мутации биопримесей. Повышенное образование облачности на аэропланктоне, и последующее выпадение мутировавших патогенных микроорганизмов вместе с дождями на новых территориях до 3 тыс. км от первичного эпидемиологического очага, вносят свой вклад в биологические и в климатические процессы.

Для индукции значимых наследуемых изменений в биоте нет необходимости в сохранении клеточных форм в «жизнеспособном» состоянии – достаточно приобретения значимых изменений непосредственно в ДНК, даже находящейся в погибшей клетке (или во внеклеточном состоянии). Нуклеиновая трансгрессия обеспечивает атмосферный «Нуклеиновый круговорот» (Скобликов Н.) .

По оценкам Н. Клиорина [2] механизм турбулентной термодиффузии является структурирующим фактором, способным удерживать атмосферные аэрозоли вблизи минимума температуры атмосферы (тропопауза) в устойчивых атмосферных потоках на протяжении нескольких месяцев. Характерное время вертикального транспорта горизонтальной неоднородности порядка месяца, горизонтального – до 10 месяцев.

Литература

1.Рагульская М.В., Обридко В.Н., Розанов А.Ю. Солнечная активность, геомагнитная активность, космические лучи и атмосферные воздействия как биотропные факторы // Геомагнетизм и аэрономия. 2026. Т. 66. № 1. С. 21−40. DOI:10.7868/S3034502226010026
2. Клиорин Н., Рагульская М., Рогачевский И. Атмосферная турбулентная термодифуззия как биологический и климатический фактор. Тезисы 30-й Конференции «ССЗФ-2026», Москва, 2026, стр. 272-273

Особенности использования спутниковых данных при оценке трендов и эмиссий метана

Ракитин В.С., Фёдорова Е.И., Кириллова Н.С., Белов А.Е., Панкратова Н.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
vadim@ifaran.ru

Ключевые слова: *дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, состав атмосферы, метан, AIRS, валидация, коррекция, TROPOMI, эмиссии*

Работа посвящена разработке методических основ валидации спутниковых рядов на примере спутниковых продуктов AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder), а также идентификации типа природных источников метана и оценке эмиссий этих источников на основе измерений прибора TROPOMI. Обсуждаются основные причины несоответствия спутниковых и наземных данных по метану; предлагается метод динамической коррекции спутниковых измерений.

Измерительные данные AIRS об общем содержании (OC), средней в атмосферной толще концентрации (XGAS), а также относительной объемной концентрации (VMR) метана CH_4 на 23 уровнях давления (от 925 мБ до 1 мБ) валидированы данными 18 наземных станций мониторинговой сети NDACC за период 2003–2022 гг. Установлено наличие однонаправленного дрейфа невязки (разности между показаниями спутника и приборов NDACC, SAT-GR) данных AIRS по OC CH_4, XCH_4 и VMR. Для каждого из упомянутых выше параметров были рассчитаны частные (постанционные) и средние коэффициенты дрейфа невязки; на основании этих коэффициентов была выполнена коррекция орбитальных рядов.

Эффективность предложенной коррекции была проверена на основе сопоставления с независимым набором данных (18 станций сети TCCON). В результате проведенной коррекции и последующих сопоставлений существенно улучшились характеристики соответствия между спутниковыми и наземными рядами обеих наземных сетей, а оценки трендов, различавшиеся до коррекции в 2-3 раза, практически совпали.

Таким образом, в докладе представлена система корректирующих коэффициентов для версий 6 и 7 прибора AIRS – для всех трех видов данных по метану: OC, XGAS и VMR на 23 высотных уровнях.

На основе анализа измерений спутникового спектрометра TROPOMI выполнены оценки мощности двух природных источников метана в районе полуострова Таймыр: 106±23 кг/км^2/день (источник круглогодичного действия) и 134±12 кг/км^2/день (летний источник).

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта №25-77-31009.

Литература

1. Rakitin V., Fedorova E., Skorokhod A. et al. Principles of Correction for Long-Term Orbital Observations of Atmospheric Composition, Applied to AIRS v.6 CH_4 and CO Data // Remote Sens. 2025. 17. 2323.

2. Rakitin V., Fedorova E., Skorokhod A. et al. Validation of Long-Term Methane (CH_4) Satellite Measurements from the AIRS Spectrometer and Correction of Their Temporal Drift // Remote Sens. 2026. 18. 1162.

3. Fedorova E., Rakitin V., Skorokhod A. et al. Altitude and Geographic Sensitivity Characteristics of the AIRS Satellite Spectrometer and Drift Correction Using Methane (CH_4) Data // Remote Sens. 2026. 18. 2875.

Формирование зимних эпизодов загрязнения воздуха в Москве: роль локальных и крупномасштабных атмосферных процессов

Ревокатова А.П.[1], Кузнецова И.Н.[1], Лезина Е.А.[2]
[1]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[2]*ГПБУ Мосэкомониторинг, Москва, Россия*
revokatova@gmail.com

Ключевые слова: *городская атмосфера, термическая неоднородность мегаполиса, температурная инверсия, загрязнение атмосферного воздуха, антропогенное тепло, микроволновый профилемер*

Для выявления особенностей атмосферных процессов, участвующих в формировании загрязнения приземного воздуха в Московском мегаполисе использованы данные о температуре воздуха шести микроволновых профилемеров МТП-5, измерений на Останкинской телебашне (ОТБ) и данных радиозондирования в г. Долгопрудном в январе 2026 г. Городские эффекты лучше всего обнаруживаются при ослаблении крупномасштабного переноса, в неблагоприятных для очищения воздуха метеорологических условиях (далее - НМУ). НМУ формируются в малоградиентных барических полях в центре и на периферии антициклонов, в барических депрессиях и седловинах в отсутствие существенных осадков. Данные температурных профилемеров МТП-5 и измерения ветра и температуры на ОТБ дают возможность установить количественные показатели «городского» влияния, некоторые из которых представлены в ряде публикаций [1, 2]. Проведенные нами сравнения данных МТП-5 с данными ОТБ и радиозонда показали, что профилемеры в основном корректно идентифицируют ключевые вертикальные структуры поля температуры (приземную инверсию, инверсию оседания, нейтральную и неустойчивую стратификацию в подинверсионном слое). С использованием маркеров загрязнения (часовые концентрации NO_2, NO, PM_{10} и CO на сети ГПБУ «Мосэкомониторинг») показано, что при НМУ, под влиянием городского острова тепла, приземная инверсия температуры на холодных окраинах преобразуется в центре мегаполиса в приподнятую (с нижней границей около 200 м). При сохранении такой термической структуры в направлении теплового шлейфа в подветренной части мегаполиса фиксируется повышение загрязнения приземного воздуха. Антропогенное тепло вносит решающий вклад в усиление термической неустойчивости в мегаполисе в штилевых условиях. Одной из важных особенностей исследуемых эпизодов является усиление инверсии днём, приводящее к росту уровня загрязнения.

Литература

1. Варенцов М.И., Юшков В.П., Миллер Е.А., Константинов П.И. Вертикальная структура городского острова тепла по данным микроволнового дистанционного зондирования // Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере. — М.: ГЕОС, 2017. — С. 113–129.
2. Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Борисов Д.В Методы прогнозирования метеорологических условий, влияющих на загрязнение приземного воздуха // Метеорология и Гидрология. 2024 № 8. с.87-103. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-8-87-103

Определение потоков углерода в Центральной Сибири по результатам многолетнего мониторинга CO_2 на высотной мачте ZOTTO

Рублев А.Н.[1], Голомолзин В.В.[2], Киселева Ю.В.[1], Горбаренко А.В.[3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*СЦ НИЦ «Планета», Москва, Россия*
[3]*Сколтех, Москва, Россия*
rublev@ifaran.ru

Ключевые слова: *диоксид углерода, потоки углерода, обсерватория ZOTTO, вертикальные профили, Центральная Сибирь, NEE*

В докладе представлено развитие методики [1,2] оценки потоков углерода для футпринта высотной мачты обсерватории ZOTTO в Центральной Сибири, основанной на измерениях вертикальных профилей концентрации CO_2. В алгоритм внесены два изменения. Первое — фильтрация нисходящих потоков при зимних и ночных инверсиях. Поскольку мачта расположена на холме с превышением примерно 40–50 м над его подножьем в западном направлении, радиационные инверсии вызывают гравитационный сток воздуха. Этот перенос CO_2 ранее ошибочно интерпретировался как поглощение поверхностью, занижая эмиссию. Второе — корректное выделение ночной эмиссии из суточного хода после фильтрации аномалий. Суточная величина чистого экосистемного обмена (NEE) рассчитана суммированием ночной эмиссии и дневного потока.

По модифицированной методике получен часовой массив потоков углерода с июня 2009 по декабрь 2021 г. Интегральные месячные потоки зимой, за вегетационный период и за год близки к диапазону данных станций сети RUFLUX для контрастных экосистем (сосновый бор — болото). При этом летние расхождения полученных оценок с месячными потоками службы CAMS (по данным спутника OCO-2) достигают 5-кратных и более значений.

Литература

1. Рублёв А. Н., Голомолзин В. В., Горбаренко А. В., Киселёва Ю. В. Определение потоков углерода в Центральной Сибири по измерениям концентрации CO_2 на высотной мачте обсерватории ZOTTO. — Изв. РАН. ФАО, 2026, т. 62, № 3, с. 113—129.
2. Рублев А.Н., Киселева Ю.В., Голомолзин В.В., Горбаренко А.В. Оценка летних потоков углерода в Центральной Сибири по измерениям CO_2 на мачте ZOTTO и их регрессионная связь с вегетационным индексом растительности и метеоданными. — Метеор. и гидрол. 2026. В печати.

Тренды и вариации общего содержания озона над Северным Кавказом по данным измерений спектрофотометра Брюэра

Савиных В.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
amita@ifaran.ru

Ключевые слова: *общее содержание озона, спектрофотометр Брюэра, наземные измерения, изменчивость, тренд, межгодовые вариации*

Представлены результаты многолетних наблюдений и анализа временной изменчивости общего содержания озона (ОСО) на Кисловодской высокогорной научной станции (КВНС) ИФА им. А. М. Обухова РАН по данным наземных и спутниковых измерений. ОСО на КВНС с 1989 года измеряется с помощью спектрофотометра Brewer MkII #043 по прямому и рассеянному из зенита солнечному ультрафиолетовому излучению. Анализ многолетней изменчивости среднемесячных значений ОСО выполнен с помощью метода множественной линейной регрессии. Получены оценки вариаций стратосферного озона за период наблюдений с 1989 по 2023 годы, вызванные 11-летним циклом солнечной активности, квазидвухлетней цикличностью в экваториальной стратосфере (КДЦ), Арктическим колебанием (АК), Североатлантическим колебанием (САК), Эль-Ниньо – Южным колебанием (ЭНЮК), изменением аэрозольной оптической толщи (АОТ) и содержания галогенов в стратосфере Северного полушария (индекс ЭЭСХ – Эквивалентного эффективного содержания хлора). На КВНС до 2003 года линейный тренд не прослеживается (–0.1% за 10 лет), а с 2003 года – отрицательный (–1.3% за 10 лет). Изменения ОСО в течение 11-летнего солнечного цикла составляют ~1.4% с задержкой около 18-ти месяцев. Колебания ОСО под действием КДЦ составляют ~1.6% с запаздыванием около 4-х месяцев. Максимальная амплитуда вариаций ОСО при изменении индекса Ниньо-3.4 ~1.9% с запаздыванием около 4-х месяцев, при этом фаза Эль-Ниньо приводит к увеличению ОСО, а Ла-Нинья – снижению. Изменения ОСО в связи с АК и САК составляют ~2.8% и ~1% с задержкой порядка 2-х и 5-ти месяцев соответственно, причём отрицательные фазы колебаний сопровождаются увеличением ОСО. Извержение вулкана Пинатубо вызвало снижение ОСО на ~3.4% с задержкой около 14-ти месяцев. Вследствие увеличения содержания галогенов в стратосфере (индекс ЭЭСХ) до конца 1990-х годов ОСО снижалось со скоростью ~1% за 10 лет, а с 1998 года – увеличивалось на ~0.5% за 10 лет.
Работа выполнена в рамках Государственного задания №1022041800069-7-1.5.9.

Литература

1. World Meteorological Organization. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 509 p.; WMO: Geneva, 2022.
2. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 151 p.: Geneva: IPCC, 2014.
3. Savinykh, V.V., Elansky, N.F., Gruzdev A.N. Interannual variations and long-term trends in total ozone over the North Caucasus, Atmos. Environ. 251, 118252, 2021.

Космическая миссия: от разработки основных принципов создания обитаемых планет до поиска разумных миров

Сафронов А.Н.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
safronov_2003@mail.ru

Ключевые слова: *образование планеты, атмосферы и океана, природный ядерный реактор, закон плавучести Архимеда, палеоклимат, массовые вымирания*

На конференции мы представляем мини-обзор серии статей автора, посвященных исследованию космоса, образованию нашей планеты, ее атмосферы, морей и океанов. Данная серия статей охватывает широкий круг вопросов. Общая структура исследования делится на ряд взаимодополняющих исследований: (A) – сильного воздействия на планету при попадании кометы и отделении Луны; (B) – умеренного воздействия на планету в результате галактической турбулентности с образованием крупных магматических провинций (LIPs) и срединно-океанических хребтовых базальтов (MORBs), с изменением уровня мирового океана и массовыми вымираниями; (C) – слабого воздействия на планету при спин-орбитальном планетарном резонансе с увеличением вулканической и сейсмической активности и изменением климата. На основе теории плавучести было дано простое объяснение наличия границ в структуре Земли. Показано, что ядерный слой ^{40}K соответствует границе между верхней и нижней мантией; слой ^{137}Cs расположен на границе между нижней мантией и внешним ядром планеты; ядерный слой Th – U является границей между внешним и внутренним ядром. Ранее абстрактные теории субдукции и дрейфа континентов приобрели ясный и очевидный физический смысл. Автор предлагает перейти от классической мантийно-коровой структуры Земли к плазменно-слоистой структуре, образованной горячими слоями ядерного топлива и теплыми слоями распада ядерных элементов. Согласно этой концепции, планеты следует рассматривать как не сформировавшиеся или остывшие звезды. Показано, что ядерный слой ^{40}K является основой новой вулканологической и сейсмологической теории, ревизии теории субдукции и дрейфа континентов, происхождения воды, нефти, руд и алмазов, вязкого жидко-капельного разделения Луны и Земли, образования моноконтинента Родинии и лунного континента на обратной стороне нашего спутника, и, наконец, этот слой топлива ^{40}K является вехой основных принципов создания обитаемых планет. Всего было опубликовано 13 работ, ключевые из них приведены ниже.

Литература

1. Safronov A.N. International Journal of Astronomy and Astrophysics. 2016. V.6. P.512–554.
2. Safronov A. N. International Journal of Geosciences. 2020. V.11. P.251-287.
3. Safronov A.N. International Journal of Geosciences. 2022. V.13. P.115-137.
4. Safronov A.N. International Journal of Geosciences. 2023. V.14, P.547-583.
5. Safronov, A.N. Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology. 2024. V.10, P.681-692.
6. Safronov A.N. Open Journal of Geology, 2025. V.15. P.309-330.

Мониторинг приземного озона и аэрозоля на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА и в г. Кисловодске

Сеник И.А., Артамонова М.С., Сеник В.А., Максименков Л.О.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
senik_ia@list.ru

Ключевые слова: *фоновый и городской уровень озона, массовая концентрация аэрозоля, PM1, PM2,5, плато Шаджатмаз, город Кисловодск*

Представлены результаты многолетних наблюдений на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН (КВНС) приземного озона (с 1989 г.) и аэрозоля, а также результаты наблюдений приземного озона, аэрозоля, CO, NO_x в г. Кисловодске (с 2008 г.) на стационарном пункте измерений. Проведение регулярных наблюдений аэрозоля в г. Кисловодске и на КВНС обеспечивает безопасность климатолечения в городах-курортах, необходимо для определения влияния климатических изменений и урбанизации КМВ на состояние эко-ресурсов курортов региона.

Благодаря расположению КВНС на плато Шаджатмаз на высоте 2070 м (над пограничным планетарным слоем) в условиях отсутствия антропогенной составляющей загрязнения, на станции зарегистрированы процессы, характерные для свободной тропосферы, перераспределение озона в подветренной области гор под воздействием гравитационных волн (ВГВ). Приводятся многолетние данные приземной концентрации озона, измеренные на КВНС, которые обнаруживают квазидвухлетние вариации, связанные с влиянием крупномасштабной циркуляции атмосферы. Был выявлен фоновый уровень массовой концентрации аэрозоля (PM1, PM2.5) на КВНС для разных сезонов года.

Представлены годовые среднесуточные концентрации аэрозоля, приземного озона, CO и NOx в г. Кисловодске. Определен дисперсный состав аэрозоля для разных сезонов года. Приведены данные маршрутных экспедиционных измерений параметров приземного воздуха в городах КМВ для 2000 и 2008 гг.

Приводятся эпизоды 26.03.2020 и 25.04.2024 регистрации переноса пыли из Сахары и с Арала на регион КМВ, когда массовая концентрация аэрозоля в г. Кисловодске и на КВНС в несколько раз превышала ПДК. Установлено, что такие эпизоды повышают средний уровень массовой концентрации аэрозоля в регионе в течение следующих 5-10 дней.

Использование беспилотных авиационных систем в гидрометеорологических наблюдениях

Ситников Н.М., Колдаев А.В.
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия
sitnikovnm@mail.ru

Ключевые слова: *беспилотные авиационные системы, измерение параметров атмосферы, пограничный слой атмосферы, мониторинг загрязнений*

Представлены результаты работ по разработке методов и средств гидрометеорологических наблюдений на базе беспилотных авиационных систем (БАС), выполненных авторами в рамках различных проектов. Обсуждаются вопросы использования беспилотных авиационных систем (БАС) для проведения гидрометеорологических наблюдений. Рассмотрены перспективы и преимущества использования БАС для решения различных задач, таких как метеорологическое обеспечение полетов авиационной и космической техники, измерение пространственных распределений параметров атмосферы и ее газового и аэрозольного состава, мониторинг окружающей среды и других. Представлены образцы бортовой аппаратуры для измерения метеорологических параметров атмосферы и некоторых составляющих газового и аэрозольного состава, результаты лабораторных и полевых испытаний, а также результаты измерений пространственных распределений параметров атмосферы и концентрации газовых примесей с борта БАС. Отмечено, что на базе БАС различных типов могут быть созданы как специализированные средства, направленные на решение одной задачи, так и многоцелевые, имеющие сменные бортовые аппаратно-программные комплексы, которые устанавливаются на борт БАС в зависимости от решаемой задачи. Определен круг задач, которые могут быть решены с использованием БАС. К таким задачам относятся определение термодинамического состояния пограничного слоя атмосферы, мониторинг загрязнений в районах чрезвычайных ситуаций, обнаружение опасных погодных явлений и многие другие. Отмечено, что с использованием БАС можно значительно расширить круг атмосферных исследований. Средства на базе БАС способны производить измерения, ранее доступные только самолетам-лабораториям, тогда как стоимость БАС, также как и стоимость их эксплуатации на несколько порядков ниже стоимости самолетов-лабораторий.

Литература

1. Ситников Н.М., Акмулин Д.В., Борисов Ю.А., Ситникова В.И., Соколов А.О., Улановский А.Э., Чекулаев И.И., Равеньяни Ф.. Использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга атмосферы. Метеорология и гидрология, 2013, №1, с. 90-99.
2. Ситников Н.М. и др. Возвращаемый аэрологический зонд на базе беспилотного или дистанционно пилотируемого летательного аппарата для баллонного зондирования атмосферы. Метеорология и гидрология, 2014, №9, с.90-96.

Микроструктура летних смогов на Северной Китайской равнине в 2012-2013 гг.

Степанова Е.В., Горчаков Г.И., Карпов А.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
step@ifaran.ru

Ключевые слова: *аэрозоль, микроструктура аэрозоля, тонкодисперсная фракция аэрозоля*

В [1] с использованием данных AERONET описана микроструктура аэрозоля в зимних (нефотохимических) смогах на Северной Китайской равнине (СКР). К смогам отнесены случаи наблюдения на станциях AERONET в г. Пекине и на станции XiangHe в пригороде Пекина, когда аэрозольная оптическая толщина (АОТ) ослабления на длине волны 440 нм превышала 1.0. В летний сезон в мегаполисах возникают фотохимические смоги. В то же время летом на СКР кроме фотохимического должен действовать и нефотохимический механизм смогообразования.

Важной характеристикой смогов является АОТ (и ее спектральная зависимость), по значениям которой на длине волны 440 нм выделены просто смоги ($1.0 \leq$ АОТ < 2.0), плотные смоги ($2.0 \leq$ АОТ < 4.0) и экстремальные смоги (АОТ ≥ 4.0) в регионе Пекина, зарегистрированные на станциях AERONET Beijing, Beijing-CAMS, Beijing_RADI и в пригороде Пекина на станции AERONET XiangHe. Показатель Ангстрема (степенная аппроксимация спектров ослабления) в области 440–870 нм в летний сезон изменялся в пределах от 0.74 до 1.63. Для области спектра 675–1020 нм показатели Ангстрема оказались выше, чем для области 440–870 нм. Распределения частиц по размерам оказались бимодальными. Определяющий вклад в ослабление в видимой области спектра вносила тонкодисперсная фракция аэрозоля (медианный радиус тонкодисперсной фракции варьировал от 0.17 до 0.45 мкм, а грубодисперсной – от 2.12 до 4.56 мкм). Полуширина аппроксимирующих распределений для тонкодисперсной фракции варьировала от 0.34 до 0.97, а для грубодисперсной от 0.34 до 0.76.

В летний сезон иногда наблюдались слабопоглощающие смоги, когда альбедо однократного рассеяния в диапазоне длин волн от 440 до 1020 нм достигало 0.98–0.99, мнимая часть коэффициента преломления снижалась до 0.001 – 0.002.

Условия смогообразования в разных пунктах наблюдения на СКР летом 2012 – 2013 гг. заметно различались. В частности, в этот период на станции AERONET Beijing_RADI не были обнаружены экстремальные смоги.

Авторы благодарят команду AERONET за возможность использования данных мониторинга оптических и микрофизических характеристик аэрозоля. Работа выполнена в ИФА им. А.М. Обухова РАН по Госзаданию FMWR-2025-0007 №1022041800069-7-1.5.9.

Литература

1. Gorchakov G. I., Datsenko O. I., Karpov. A. V., Gushchin R. A. Microstructure and Absorption Capacity of Aerosol in Nonphotochemical Smog // Doklady Earth Sciences. 2026. V. 528, 1. DOI 10.1134/S1028334X25609861

Опыт применения моделей машинного обучения для определения НМУ

Татаринович Е.В., Борисов Д.В., Кузнецова И.Н.
Гидрометцентр России, Москва, Россия
e.tatarinovich@yandex.ru

Ключевые слова: *НМУ, методы машинного обучения, локальная модель НМУ*

Для идентификации неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) применены методы машинного обучения. Для исследований выбран район Москвы – Останкино. В работе использованы данные измерений метеорологических характеристик на телебашне Останкино (ОТБ) в слое до высоты 503 м, ретроспективные данные ERA5 о ветре на изобарической поверхности (и.п.) 925 гПа, сумме осадков за 3 часа и высоте пограничного слоя атмосферы, а также данные измерений концентраций загрязняющих веществ за период 2020-2025 гг. В качестве индикатора НМУ выбрано условие одновременного превышения 90-го процентиля распределения концентраций наиболее чувствительных к метеоусловиям двух загрязняющих веществ – угарного газа (CO) и оксида азота (NO).

На основе сформированной пятилетней выборки протестированы пять моделей машинного обучения (ММО) различной архитектуры. Установлено, что для задачи бинарной классификации НМУ ансамблевые методы (CatBoost, случайный лес) обеспечивают наилучший баланс между минимизацией пропусков и ложных тревог (F1 = 0.62–0.64). При анализе обученных моделей выявлены наиболее информативные предикторы НМУ; в их число вошли скользящие средние за 3–6 ч разности температуры в слое 2-253 м и метеорологического параметра MP (произведение средней скорости ветра по измерениям на высотах 201, 253, 305 м ОТБ и разности температуры в слое 2-253 м, нормированной на высоту 253 м), а также осредненной по высотам ОТБ скорости ветра, которые отражают основные физические механизмы переноса и накопления загрязняющих веществ в приземном воздухе. Значимые предикторы НМУ могут послужить основой для усовершенствования применяемых статистических методов прогнозирования НМУ.

Комбинированная система мониторинга атмосферного воздуха: лабораторное и численное исследование переноса и осаждения минеральных аэрозолей

Тимошенко Ф.А.[1,2]
[1]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
tfedor03@gmail.com

Ключевые слова: *атмосферные аэрозоли, экологический мониторинг, минеральные частицы, комбинированная система мониторинга, лазерный контроль, оптико-цифровой анализатор, численное моделирование, перенос частиц, осаждение аэрозолей, дисперсный состав*

Для повышения информативности мониторинга атмосферных аэрозолей предложена комбинированная система, объединяющая лазерный модуль для измерения счётной концентрации, оценки массовой концентрации и фракционного состава с оптико-цифровым анализатором для определения размеров, формы и морфологических признаков осаждённых частиц. Для исследования переноса и осаждения минеральных аэрозолей проведено моделирование трёх конфигураций измерительного канала в SOLIDWORKS Flow Simulation; гидродинамические процессы дополнительно рассмотрены в ANSYS Fluent. Исследованы частицы доломита диаметром 1–50 мкм при расходе воздуха 1,5 л/мин с учётом гравитации. На измерительной поверхности задано поглощение частиц, на остальных стенках — отражение. Рассмотрены идеально упругие столкновения (нормальный и тангенциальный коэффициенты восстановления скорости равны 1) и частично неупругие (0,8 и 0,9 соответственно). При идеальном отражении установлено, что доля частиц, поглощённых измерительной поверхностью, нелинейно зависит от диаметра и геометрии канала. Для первых двух конфигураций наблюдается рост поглощения с увеличением размера, для третьей — немонотонная зависимость. Только в третьем канале зарегистрировано поглощение фракций 1–2,5 мкм; при 10 мкм поглощение отсутствует во всех конфигурациях. Для частиц 25–50 мкм выявлены существенные различия между каналами и локальные изменения зависимости. Совместное применение лазерного контроля и цифровой микроскопии расширяет набор исследуемых характеристик аэрозолей, сочетая концентрационные измерения с анализом размеров и морфологии частиц. Моделирование позволяет оценить размерную селективность осаждения и обосновать дальнейшую экспериментальную проверку системы.

Выбросы SO_2 и CO_2 от эксплозивных извержений вулканов Курило-Камчатской дуги (2020–2025): оценка по спутниковым данным с учётом неопределённостей

Тихонов С.А.
Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия
tsa@emsd.ru

Ключевые слова: *вулканы, Курило-Камчатская островная дуга, пепловые выбросы, спутниковый мониторинг, C/S-отношение*

В работе получены количественные оценки суммарных выбросов SO_2 и CO_2, поступивших в атмосферу с пепловыми и парогазовыми шлейфами активных вулканов Курило-Камчатской островной дуги в период 2020–2025 гг. Использованы ежедневные оценки масс SO_2 по данным прибора TROPOMI (проект NASA). Результаты по 948 дням с зафиксированной активностью верифицированы сопоставлением с данными Фактографической базы «Активность вулканов Камчатки» [1], т.е. корреляцией с материалами наземных сейсмологических и геофизических наблюдений.

Для учёта неопределённостей измерений (включая погрешности продукта NASA по SO_2 и вариации соотношений C/S) применён метод Монте-Карло. Суммарные объёмы выбросов SO_2 и CO_2 вулканического происхождения за указанный период соответствуют типичным значениям для островных дуг с сопоставимой тектонической активностью.

Наиболее значимые отдельные выбросы SO_2 (>1 кт) соответствуют активности вулканов Шивелуч, Ключевской, Крашенинникова, Безымянный, Карымский, Чикурачки, Чиринкотан и Эбеко.

Полученные временные ряды по выбросам SO_2 и CO_2 позволяют прослеживать связь между периодами повышенной сейсмической активности в Курило-Камчатском регионе и интенсификацией вулканических выбросов, что актуально для задач комплексного геофизического мониторинга.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26) и с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

Литература

1. Активность вулканов Камчатки : фактографическая база данных : свидетельство о государственной регистрации № 2014620148 / С. Л. Сенюков, В. Т. Гарбузова, С. Я. Дрознина, И. Н. Нуждина, Т. Ю. Кожевникова. — Москва, 2014. — URL: https://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm (дата обращения: 09.05.2026)

Деградирующие полигональные торфяники южных тундр Западной Сибири как источники метана: ключевые факторы и (суб)региональные оценки эмиссии

Устинов Н.Б.[1], Ларина А.В.[1], Гаврилов Г.О.[1], Казанцев В.С.[1], Белов А.Е.[1], Цветнова Е.А.[1], Усачева А.А.[2], Новикова Е.В.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия*
nikustinov@ifaran.ru

Ключевые слова: *арктические торфяники, парниковые газы, эмиссия метана, деградация мерзлоты*

Систематические исследования полигональных торфяников как источников метана CH_4 проводились во всех тундровых подзонах, кроме южных тундр, где чувствительность этих экосистем к потеплению климата максимальна. Ради восполнения этого пробела мы изучили эмиссию CH_4 из полигональных торфяников Пур-Тазовского междуречья на уровне отдельных микроландшафтов – сухих останцов полигонов, влажных сфагновых ковров и обводненных мочажин. Исследования проводились летом 2023–2025 гг. на 3 участках одинаковой площади, в пределах которых насчитывалось 8 точек измерения, включая 2 точки ежегодного суточного мониторинга на лужайке и на мочажине. Линейная модель смешанных эффектов выявила определяющее влияние глубины протаивания и уровня болотных вод (УБВ) на измеренные потоки CH_4. Разделение эффектов этих переменных по микроландшафтам с помощью обобщенной аддитивной модели позволило предсказать рост потоков CH_4 со сфагновых ковров на 0.21 (0.44) мг CH_4 $м^{-2}$ $ч^{-1}$ с каждым сантиметром протаивания (подъема УБВ к поверхности почвы); потоки CH_4 из мочажин не зависели от УБВ, увеличиваясь со скоростью 0.30 мг CH_4 $м^{-2}$ $ч^{-1}$ $см^{-1}$ при углублении сезонно-талого слоя. По результатам ежегодного мониторинга был выявлен выраженный суточный профиль потоков CH_4 из мочажины, отсутствующий на сфагновом ковре.

Стохастическое масштабирование предсказанных потоков CH_4 на (суб)региональный уровень учитывало: 1) различное соотношение микроландшафтов от участка к участку по данным БПЛА-съемки; 2) различную продолжительность периода эмиссии от года к году; 3) понижающую поправку на среднесезонный уровень эмиссий; 4) неопределенность покрытия целевой территории данным типом торфяников. Согласно результирующей оценке, полигональные торфяники южных тундр Западной Сибири выделяют 17.5 [6.4–35.9] килотонн CH_4 ежегодно, что составляет до 1/5 от суммарного бюджета CH_4 всех тундровых болот региона.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФА РАН 1024100700065-687 0-1.5.11.

Структура и интенсивность летних осадков в Москве по данным непрерывных наблюдений

Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Лябина В.А., Акопян С.С.
ГПБУ Мосэкомониторинг, Москва, Россия
ShalyginaIY@eco.mos.ru

Ключевые слова: *интенсивность осадков, ливни, непрерывные наблюдения, генезис осадков*

В Москве действует сеть непрерывного мониторинга осадков. Метеокомплексы установлены на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА), расположенных на всей территории города. Мониторинг осадков проводится осадкомерами, входящими в метеокомплексы, установленные на АСКЗА; измерение осадков производится каждые 20 минут.

Проанализированы данные непрерывных наблюдений за теплый сезон (апрель-октябрь) 2020-2025 гг. на 23 АСКЗА. Сильные ливни, зафиксированные в городе, были обусловлены 2 основными процессами: прохождение атмосферных фронтов или внутримассовые процессы. Ежегодно в Москве наблюдается от 12 до 22 дней с ливнями интенсивностью 30 мм осадков и более за 1 час и менее. Количество дней с сильными ливнями в году обусловлено особенностями синоптических процессов.

Сильные осадки на территории города выпадают неравномерно. Локальный характер ливней приводит к существенным различиям в их интенсивности и объёме в разных районах города. При прохождении атмосферного фронта осадки выпадают на большей части города, сильные вблизи зоны атмосферного фронта. Внутримассовые осадки выпадают локально, на большей части города осадков может не наблюдаться.

Мониторинг состава атмосферы: совместное восстановление профилей аэрозоля и диоксида азота по измерениям MAX-DOAS

Шамсутдинов Д.Р., Постыляков О.В., Боровский А.Н.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
a.danil.dark@gmail.com

Ключевые слова: *MAX-DOAS, аэрозоль, диоксид азота, вертикальные профили, обратные задачи, многозадачное обучение, нейронные сети, трансформер, дистанционное зондирование атмосферы, CAMS, мониторинг загрязнения воздуха, радиационный перенос, Звенигородская Научная Станция*

В работе рассматривается задача одновременного восстановления вертикальных профилей объемного коэффициента ослабления аэрозоля и концентрации диоксида азота в приземном слое тропосферы по многоугловым измерениям MAX-DOAS. Классические каскадные подходы ведут к неизбежному переносу ошибок между этапами. Совместный анализ физически обоснован общими источниками эмиссии и метеорологическими факторами формирования. Предложена архитектура глубокого обучения (трансформер), выполняющая одновременное восстановление обоих профилей. Нейросеть обрабатывает наклонные оптические толщи димера кислорода и NO_2 для разных углов места, а также положение Солнца. Для балансировки функции потерь применен адаптивный подход на основе оценки неопределенности. Обучение проводилось на синтетическом датасете (профили PM_{10} и NO_2 из реанализа CAMS 2018–2022 гг. для Звенигородской научной станции ИФА РАН). Моделирование измерений выполнено в радиационной модели MCC++. Применена аугментация данных (шум, временные метки). Тестирование показало высокую точность восстановления профилей в нижнем 2-километровом слое (пограничный слой атмосферы). Многозадачное обучение снизило ошибку по сравнению с независимыми моделями за счет учета физических связей. Подход обеспечивает значительное ускорение обработки, что важно для оперативного мониторинга состава атмосферы и физики пограничного слоя.

Литература

1. Frieß U. et al. Intercomparison of MAX-DOAS profiles // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. P. 2155–2181.
2. Kendall A. et al. Multi-task learning using uncertainty to weigh losses // Proc. CVPR. 2018. P. 7482–7491.
3. Vaswani A. et al. Attention is all you need // NeurIPS. 2017. V. 30. P. 5998–6008.
4. Постыляков О.В. и др. Сравнение методов восстановления профиля NO_2 // Совр. пробл. ДЗЗ из космоса. 2026. Т. 23, № 4. С. 377–389.

Влияние химических и аэрозольных граничных условий на результаты комплексного моделирования атмосферы Каспийского региона с помощью WRF-Chem

Швец П.А., Мостаманди С.В.
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
shvets.pa@phystech.edu

Ключевые слова: *Каспийское море, состав атмосферы, перенос примесей, WRF-Chem, химические граничные условия, аэрозоль, пыль, морская соль, вымывание осадками, CAMS, MERRA-2*

Уровень Каспийского моря – крупнейшего бессточного водоема Земли – в последние десятилетия быстро снижается. На мелководном Северном Каспии это обнажает обширные участки дна, которые, как показывает пример Аральского моря, могут стать источниками пыли и солей. Аэрозоль рассеивает и поглощает излучение, а выступая ядрами конденсации и кристаллизации, меняет микрофизику облаков и режим осадков. В регионе сосредоточены крупные антропогенные источники – мегаполисы и нефтегазовая отрасль.

Для регионального моделирования состава атмосферы применяются модели с совместным расчетом динамики и химии, например WRF-Chem [1]. Концентрации примесей в них зависят от локальных эмиссий и притока через боковые границы. Расширение области ослабляет влияние границ, но при высоком разрешении резко увеличивает затраты. Для Каспия важен перенос пыли из пустынь Средней Азии и Ближнего Востока, задаваемый именно граничными условиями, поэтому результаты могут зависеть от их источника.

В работе оценивается влияние химических и аэрозольных граничных условий на моделирование состава атмосферы региона. Расчеты WRF-Chem с разрешением 10 км учитывают антропогенные и биогенные выбросы, эмиссию пыли и морской соли, вымывание осадками и радиационную обратную связь аэрозоля. Сравниваются эксперименты с граничными условиями из реанализов CAMS (EAC4) и MERRA-2 и контрольный расчет без химии для эпизодов с осадками зимой и летом 2023 г.

Выбор граничных условий почти не влияет на суммарную массу $PM_{2.5}$, но меняет ее состав: с MERRA-2 концентрации органического аэрозоля в 4–10 раз, а сажи до 2 раз ниже, чем с CAMS, во всей области. Различия по пыли максимальны у границ и слабеют к центру – это указывает на трансграничный перенос. Из газов чувствительнее всего CO (около 20%). Учет аэрозоля уменьшает приток солнечной радиации к поверхности на 7–9% и снижает летнее завышение осадков относительно ERA5 с 21 до 14%, тогда как метеорологические различия между экспериментами с CAMS и MERRA-2 не превышают 1–2%.

Литература

1. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model / G. A. Grell, S. E. Peckham, R. Schmitz [et al.] // Atmospheric Environment. – 2005. – Vol. 39, No. 37. – P. 6957–6975. – DOI 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.

Систематизация температурных инверсий пограничного слоя Южного Прибайкалья и их влияния на содержание примесей в атмосфере

Шиховцев М.Ю., Печкур Д.Ю., Моложникова Е.В.
Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия
maxim@lin.irk.ru

Ключевые слова: *температурные инверсии, пограничный слой атмосферы, МТП-5, радиозондирование, загрязнение атмосферы*

Работа посвящена систематизации температурных инверсий (ТИ) в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья. Анализ выполнен по данным аэрологических наблюдений в долине р. Ангары (ст. Ангарск, 1989-2025 гг.) и измерений микроволнового профилемера МТП-5, установленного на юго-западном побережье оз. Байкал (ст. «Листвянка», 2023-2025 гг.). Типизация ТИ выполнена в соответствии с [1].

В слое 0-1000 м ТИ отмечены в 66 % профилей зондирования. Приземная инверсия выделена в 45 % случаях, приподнятая в 14 %, их сочетание в 6 %. Чаще всего инверсии возникают в декабре и феврале (90-92 %), реже всего в мае (34 %). В межгодовой динамике наблюдается увеличение повторяемости ТИ с 61 % в 1989-1991 гг. до 70 % в 2023-2025 гг. Рост обусловлен приземными (с 45 до 48 %) и двухслойными ТИ (с 4 до 10 %).

На ст. Листвянка за период с 2023 по 2025 гг. ТИ отмечены в 51 % профилей: приземные в 24 %; приподнятые в 26 %; двухслойные в 2 %. Реже всего ТИ возникают в октябре (15 %), чаще всего – в январе и феврале (72 и 77 %). Внутригодовой ход связан с термическим и ветровым режимом озера. Осенью водная масса Байкала прогревает нижний слой атмосферы, препятствуя образованию ТИ. После ледостава отепляющее влияние озера прекращается, а ледовая поверхность выхолаживается так же, как суша. Зимой преобладают приподнятые ТИ, весной и летом приземные. Суточный ход повторяемости ТИ наименее выражен зимой (от 72 % в 08 ч до 62 % в 17 ч). Весной и летом максимум приходится на предрассветные часы (60 % в 05 ч и 55 % в 03 ч), минимум – на дневные (43 % в 15 ч и 35 % в 11 ч). Осенью от 40 % ночью до 25 % в 13–16 ч.

Стратификация атмосферы влияет на содержание газовых примесей в приземном слое побережья [2]. Наиболее ярко это проявляется при северо-западном переносе воздушных масс со стороны Иркутской агломерации. При том же направлении ветра медианные концентрации SO_2 и NO_2 в условиях инверсий в 1,7–2,1 раза выше, чем при их отсутствии. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 26-77-00044.

Литература

1. Статистика инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы над г. Томском / А. П. Камардин, В. А. Гладких, И. В. Невзорова, С. Л. Одинцов. – Текст : непосредственный // Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36, № 9. – С. 742–753.

2. Influence of air movement structure on microphysical properties of the atmosphere over Listvyanka / M. Y. Shikhovtsev, A. Y. Shikhovtsev, P. G. Kovadlo [et al.]. – Text : direct // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2025. – Vol. 38, № 2. – P. 180–187.

Вертикальное распределение озона в тропо-стратосфере на территории Приволжского федерального округа

Шишкин Г.И.
Институт экологии, биотехнологии и природопользования КФУ, Казань, Россия
mr.GoraShi@mail.ru

Ключевые слова: *озон, тропосфера, стратосфера, вертикальное распределение, концентрация*

Представленное исследование на основе осреднённых ежемесячных многоуровневых данных реанализа (CAMS) за период 2003-2023 гг. демонстрирует, что содержание озона в атмосфере Приволжского федерального округа (ПФО) варьируется по вертикали, пик концентрации приходится на верхние уровни стратосферы.

Вблизи поверхности земли концентрация озона минимальна и составляет около 70 ppb. Основная причина такого низкого содержания связана с активным разрушением озона в присутствии NO, CO и других предшественников, выделяемых промышленностью и транспортом. Далее отмечено повышение концентрации озона с ростом высоты. На уровне около 10 гПа, в среднем слое стратосферы, озон достигает максимальной концентрации около 13000 ppb благодаря фотохимическому образованию под действием УФР, присутствию свободного атомарного кислорода и оксида азота, а также медленному темпу фотолиза. Выше 10 гПа концентрация озона начинает падать, по причине снижения доступности свободных атомов кислорода и радикалов, участвующих в синтезе озона, а также увеличением роли фотолиза самого озона под действием УФР.

В тропосфере (1000-200 гПа) выделен сезонный ход с минимумами в холодный период года и максимумами в теплый, с наличием высотного сдвига экстремумов, что соответствует континентальному циклу и указывает на доминирование фотохимии при интенсивной солнечной радиации. На уровнях 100-30 гПа - инверсия сезонного хода: минимумы в сентябре-августе и максимумы в феврале-январе. Зимой усиление меридионального переноса в Брюэровской циркуляции аккумулирует озон в средних широтах и снижает скорость его фоторазрушения; в августе-сентябре преобладает УФ-разложение. В верхней стратосфере вновь отмечены минимумы в холодный и максимумы в теплый период года, что обусловлено переходом к доминированию чисто фотохимического режима формирования озонового поля. На высоте порядка 35-38 км сезонная изменчивость практически перестаёт выделяться, что свидетельствует о достижении области фотохимического равновесия.

Литература

1. Белан Б. Д. Озон в тропосфере / Б. Д. Белан. – Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2010. — 376 с. – Текст : непосредственный.
2. Данные реанализа состава атмосферы ECMWF четвертого поколения. – Текст : элек-тронный. – URL: https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-global-reanalysis-eac4?tab=overview (дата обращения: 01.06.2026).
3. Хргиан А. Х. Физика атмосферного озона / А. Х. Хргиан. – Ленинград : Гидрометео-издат, 1973. – 296 с. – Текст : непосредственный.

Проблемы численного моделирования пространственно-временного распределения приземной концентрации аэрозолей в Московском регионе

Штабкин Ю.А., Губанова Д.П., Виноградова А.А., Кириллова Н.С., Моисеенко К.Б.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
shtabkin@ifaran.ru

Ключевые слова: *мониторинг состава атмосферы, численное моделирование, аэрозоль, массовая концентрация, пространственно-временное распределение, Московский регион*

Динамика атмосферы играет ключевую роль в пространственно-временной изменчивости массовой концентрации и дисперсного состава атмосферных аэрозолей. Усилению этого эффекта способствуют специфические факторы крупного города (орография, каньоны улиц, неравномерность застройки, особый ветровой режим, городской остров тепла и другие). Применение комплексного подхода на основе численного моделирования, многопараметрической статистики и точечных экспериментальных наблюдений способствует получению более детальной информации о формировании и временной изменчивости в таких условиях полей концентрации аэрозольных частиц разных размерных фракций.

В настоящей работе рассмотрены предварительные результаты численного моделирования пространственного и временного распределения приземной концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ и PM_{10} в Московском регионе в центральные месяцы разных сезонов 2022 года. Для расчетов применялась химико-транспортная модель (ХТМ) WRF-Chem с химическим блоком GEOS (WRF-GC). Было выполнено сравнение результатов моделирования с данными измерений на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг» и ИФА РАН. Учитывая, что расхождения между модельными и измеренными концентрациями примесей могут быть вызваны не только погрешностями данных, заложенных в самой ХТМ, но и неопределенностями задания городских источников атмосферного загрязнения, обсуждаются возможные причины полученных различий в разные сезоны и способы повышения точности применяемой ХТМ.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-27-00578, https://rscf.ru/project/25-27-00578/.

Метан в западной части Евразийской Арктики в летний период 2024 года: наблюдения АМК-96 и численное моделирование

Штабкин Ю.А.[1], Кириллова Н.С.[1], Беликов И.Б.[1], Белоусов В.А.[1], Васильева А.В.[1], Пестунов Д.А.[2], Белан Б.Д.[2], Репина И.А.[1], Моисеенко К.Б.[1], Кравчишина М.Д.[3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*
[3]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
shtabkin@ifaran.ru

Ключевые слова: *состав атмосферы, судовые измерения, Арктика, метан, обратные траектории, численное моделирование*

Метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом в атмосфере после углекислого газа (CO_2). Начиная с 2005 года, согласно измерениям, наблюдается заметное увеличение концентрации метана в приповерхностных слоях атмосферы. Особенно ярко это явление проявляется в Арктике. К сожалению, для этого региона данные о приземной концентрации метана крайне ограничены, что затрудняет проведение количественных оценок воздействия эмиссий от наиболее важных региональных антропогенных и биогенных источников. Этот пробел частично восполняется многолетними наблюдениями на арктических и субарктических станциях мониторинга, а также измерительными компаниями в ходе экспедиций на научно-исследовательских судах.

В данной работе представлены результаты непрерывных измерений концентрации метана, углекислого газа и озона в приводном слое атмосферы над акваториями Карского и Баренцева морей в ходе 96-й экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК-96), 26 июля – 30 августа 2024 года. Кроме того, для эпизодов повышенного содержания метана построены обратные траектории воздушных масс и выполнено сопоставление полученных данных с расчетами региональной химико-динамической модели WRF-Chem. Для района Байдарацкой губы на основе общедоступных данных сделаны оценки потоков метана с морской поверхности и выполнено их сравнение с проводившимися в ходе экспедиции наблюдениями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-31009, https://rscf.ru/project/25-77-31009/.

Атмосферное содержание и потоки метана в западной части Евразийской Арктики поздней осенью 2023 года: судовые наблюдения и численное моделирование

Штабкин Ю.А.[1], Моисеенко К.Б.[1], Беликов И.Б.[1], Белоусов В.А.[1], Васильева А.В.[1], Кириллова Н.С.[1], Пестунов Д.А.[2], Белан Б.Д.[2], Кравчишина М.Д.[3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*
[3]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
shtabkin@ifaran.ru

Ключевые слова: *состав атмосферы, судовые измерения, Арктика, эмиссии метана, обратные траектории, численное моделирование, количественные оценки*

Измерения содержания метана в приповерхностном слое атмосферы в высоких широтах являются важной частью глобального мониторинга состава воздуха. Для арктических территорий Северной Евразии и прилегающих акваторий северных морей, подобные исследования также важны, как часть общей задачи количественной оценки потоков парниковых газов на границе земля (вода) - атмосфера и бюджета тропосферного метана. В этой связи, особую актуальность приобретают данные морских экспедиционных измерений приводных концентраций метана и исследование потоков метана с морской поверхности.

В работе представлены результаты судовых измерений приводных концентраций метана и углекислого газа в Карском и Баренцевом морях в ходе 93-го рейса научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» 08 ноября – 07 декабря 2023 года. Для эпизодов повышенной (>2050 ppb) концентрации метана построены обратные траектории воздушных масс для выявления периодов заноса воздуха с материка. Измерения были сопоставлены с результатами расчетов региональной химико-динамической модели WRF-Chem с целью пространственной локализации источников выбросов и количественной оценки потоков метана на границе вода–атмосфера. Наивысшие эмиссии метана с морской поверхности, сопровождаемые ростом концентраций до 2118 ppb, установлены для Байдарацкой губы Карского моря. Средняя рассчитанная величина потока метана в атмосферу для этого района достигала 20 мкг·м$^{-2}$·ч$^{-1}$, что сопоставимо с потоками метана в тундре на побережье Карского моря (24 мкг·м$^{-2}$·ч$^{-1}$). Полученные количественные оценки, основанные на наблюдениях приводных концентраций и общедоступных данных об эмиссиях метана с акватории шельфа и с территории арктической тундры, близки к значениям прямых измерений потоков метана на границе вода–атмосфера, выполненных с борта судна с использованием камерного метода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-31009, https://rscf.ru/project/25-77-31009/.

Предварительный анализ эволюции пограничного слоя атмосферы над неоднородной подстилающей поверхностью по данным комплекса Звенигородской научной станции

Балдандоржина А.Б.[1], Согачев А.Ф.[1,2], Репина И.А.[2], Люлюкин В.С.[2]
[1]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
arina_b2005@mail.ru

Ключевые слова: *суточная динамика и структура пограничного слоя атмосферы, температурный профилемер, ультразвуковой анемометр, турбулентный режим*

Несмотря на общее понимание научным сообществом суточной эволюции структуры пограничного слоя атмосферы (ПСА) [3], её механизмы над неоднородной подстилающей поверхностью, во многом определяющие турбулентный режим и вертикальные потоки тепла, влаги и импульса, остаются активным предметом исследования. Звенигородская научная станция Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН располагает современным комплексом для исследования турбулентной структуры и динамики пограничного слоя атмосферы, позволяющим получать одновременно контактные и дистанционные измерения. Анализ этих данных может способствовать лучшему пониманию процессов энерго- и массообмена между неоднородной поверхностью и атмосферой.

В работе анализируются данные температурного профилемера МТР-5 и ультразвукового анемометра METEK uSonic-3 Cage MP, установленного на метеорологической мачте на высоте 56 м. Измерения представлены за период с 2024 по 2025 гг..

Был подготовлен и реализован программный пакет, адаптированный к данным обоих приборов. Результаты обработки позволили выявить основные закономерности суточной динамики и структуры ПСА в районе Звенигородской станции, оценить частоту температурных инверсий, рассмотреть основные турбулентные характеристики, рассчитать параметры стратификации атмосферы и сопоставить данные двух приборов.

Для совмещения данных приборов с разными областями влияния предпринята попытка оценки футпринта метеорологической мачты Звенигородской научной станции. Расчеты выполнены по измерениям ультразвукового анемометра для дневных и ночных периодов летнего и зимнего сезонов с помощью аналитической модели Кормана–Мейкснера [1] (использованы предположения о растительном покрове) [2].

Предварительные результаты исследования данных, полученных комплексом, подтверждают перспективы дальнейшей работы в этом направлении. Продолжение исследования предполагает более тщательный подход.

Литература

1. Kormann R. An analytical footprint model for non-neutral stratification / R. Kormann, F. X. Meixner // Boundary-Layer Meteorology. – 2001. – Vol. 99. – P. 207–224.
2. Sogachev A. F., Repina I. A. Source Region of Turbulent Fluxes from a Surface (Footprint): Concept and Estimation Methods //Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2025. – Vol. 61. – №. 6. – P. 643-669.
3. Stull R.B. An introduction to boundary layer meteorology.
Dodrecht: Springer, 1988. 670 p.

Влияние пространственной неоднородности городского ландшафта на структуру масштабов атмосферной турбулентности

Барсков К.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
barskovkv@gmail.com

Ключевые слова: *атмосферный пограничный слой, городская турбулентность, неоднородная подстилающая поверхность, теория подобия Монина-Обухова*

В работе исследуется влияние пространственной неоднородности подстилающей поверхности на турбулентные статистики и спектральные характеристики турбулентности в атмосферном пограничном слое. Проведен анализ данных многолетних измерений трёхкомпонентной скорости ветра и температуры на трехуровневой метеорологической мачте, расположенной на площадке метеорологической обсерватории МГУ в условиях неоднородного городского ландшафта, включающего участки древесной растительности, здания и открытые пространства. Показано, что в неоднородном городском ландшафте энергетические характеристики турбулентности, турбулентный перенос импульса и вертикальные градиенты средней скорости демонстрируют различную чувствительность к геометрии препятствий и внешним масштабам атмосферного пограничного слоя. Горизонтальные дисперсии сохраняют выраженную связь между высотами и зависимость от высоты АПС, тогда как локальные потоки импульса могут существенно ослабевать вследствие изменения корреляционной структуры пульсаций. Спектральный анализ показал, что пространственная неоднородность городской поверхности приводит к изменению распределения турбулентной энергии по масштабам и эффективности переноса импульса, причём наиболее выраженные различия наблюдаются на высотах, сопоставимых с высотой окружающих препятствий. Полученные результаты позволяют предположить, что энергетика турбулентности и перенос импульса могут определяться различными диапазонами масштабов, а влияние неоднородности поверхности не сводится к изменению локальной скорости трения. Это создаёт предпосылки для обобщения теории подобия Монина — Обухова с учётом горизонтальных масштабов препятствий и внешней структуры атмосферного пограничного слоя.

Сравнение темпов роста плавучего льда при наличии и отсутствии конвекции воздуха в его снежном покрове

Богородский П.В., Сидорова О.Ю.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
bogorodski@aari.ru

Ключевые слова: *морской снежно-ледяной покров, конвективный теплоперенос воздуха, термодинамическая модель*

Снежный покров плавучих льдов представляет пористую среду, состоящую из ледяного скелета и насыщенных воздухом пор. При наличии в снеге температурного градиента, в нём может возникнуть конвекция, ускоряющая замерзание нижележащего слоя воды. В настоящей работе в рамках варианта задачи Стефана [1] рассмотрено влияние макроскопического движения воздуха на рост толщины льда hi(t) в течение первых 15-ти суток образования. Эволюция глубины снега hs(t) задавалась линейной зависимостью hs(t)=nhi(t) как для конвекции, так и для диффузии (n=const); расчёты выполнялись для двух вариантов снегонакопления: одинаковых толщин снега (вариант «а») и одинаковых темпов снегонакопления (вариант «б») при постоянной температуре воздуха Ta=-12°C. Использование аппроксимаций процессов конденсации и испарения пара при движении воздуха в снеге [2] позволяет свести исходную задачу к ОДУ, интегрируемому численно. При таких величинах n, температура границы снега и льда составила -2.26°C для варианта «а» и -2.31°C для варианта «б». Соответствующая разность толщин льда оказалась близкой к 5 см для конвективного и около 2.5 см для диффузионного переноса. В первые 15 суток замерзания, движение воздуха вносит существенный вклад в рост льда. С ростом глубины hs(t), разница толщины льда между обоими вариантами начинается при n, больших 0.1, достигая при n=1 величины около 2-х см. Величина Ta сказывается при её опускании ниже -5°C; при Ta= -12°C разница между вариантами достигает 4-х см, что сопоставимо с толщиной льда, близкой к 10 см, образовавшегося за этот же период.
К сожалению, из-за трудностей работ на морском льду, полученные оценки пока не могут быть подтверждены экспериментально. Поэтому, несмотря на их правдоподобность, отвечающей представлениям о процессе на качественном уровне, их следует рассматривать только как качественные, характеризующие приблизительные значения параметров эволюции рассматриваемой системы.

Литература

1. Жекамухова И.М. Расчет глубины промерзания почвы под снежным покровом с учётом конвекции воздуха в толще снега//Изв. КБНЦ РАН, 2006. № 2 (16). С. 28–36.
2. Жекамухов М.К., Шухова Л.З. Конвективная неустойчивость воздуха в снеге//ПМТФ. 1999. Т. 40. № 6. С. 54–59.

Острова тепла и концентрации PM_{10} в городах Российской Арктики по данным измерительных кампаний UHIARC и Arctic SUN

Варенцов М.И.[1,2,3], Константинов П.И.[1,4], Слуковская М.В.[5], Корнейкова М.В.[3,5], Семенова А.А.[1], Назмутдинов К.Ф.[1,2,4], Васенев В.И.[3], Бакланов А.А.[4]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия*
[4]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[5]*Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия*
mvar91@gmail.com

Ключевые слова: *остров тепла, Арктика, Заполярье, PM_{10}, качество воздуха, климат города, микроклимат*

Городской климат, включая остров тепла (ГОТ), и качество воздуха в Арктике долго оставались слабо изученными. Для восполнения пробела авторы более 10 лет назад начали экспериментальные исследования в городах Российской Арктики. В рамках кампании UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) в 2015–2024 гг. с помощью автоматических метеостанций (АМС) и термодатчиков проведены многолетние наблюдения за ГОТ в семи городах (Мурманск, Апатиты, Воркута, Салехард, Надым, Новый Уренгой и Норильск) [1,2]. Обобщение данных UHIARC подтверждает выраженную сезонность: средняя зимняя интенсивность ГОТ (ΔT) составляет 0,8–1,9 °C против <0,5 °C летом, а экстремумы (95-й перцентиль – 6–8 °C, 99-й – до 10 °C) сопоставимы с мегаполисами умеренного пояса. Наиболее сильные острова тепла формируются при наиболее устойчивой стратификации пограничного слоя, что подтверждено измерениями [3] и анализом в подходе машинного обучения. В среднем ГОТ сильнее всего в Норильске и Надыме, слабее – в Мурманске, что связано с менее устойчивой стратификацией из-за влияния незамерзающего залива.

С 2025 г. запущена сеть нового поколения Arctic SUN на базе российских автоматических метеостанций с расширенным набором параметров, включая температуру и влажность почвы и концентрации PM_{10}. Данные Arctic SUN подтверждают предыдущие выводы о ГОТ в Арктике и открывают новые возможности для сопряжённого анализа ГОТ и качества воздуха. Синхронные наблюдения в городской и фоновой точках в Апатитах выявляют не только ГОТ, но и городской «остров загрязнения» — повышенную запылённость (превышение PM_{10} в городе над фоном). В то же время, вопреки выводам о наличии корреляции между островом тепла и загрязнением воздуха во многих других городах [3], в рассмотренных арктических городах такая корреляция практически не выражена; связь между этими эффектами сложна и нелинейна и требует дальнейшего изучения.

Литература

1. Konstantinov P. et al. A high-density urban temperature network deployed in… // ERL. 2018. V. 13 P. 075007
2. Konstantinov P., Varentsov M. et al. Urban Heat Islands in the Arctic: Long-Term Observations from … // Urb. Clim., in press.
3. Varentsov M. et al., 2023. Observations of the urban boundary layer in a cold climate city// Urb. Clim. 2023. V. 47. P. 101351.
4. Ulpiani G. On the linkage between urban heat island and urban pollution …// Sci. Tot. Environ. V. 751. P. 141727.

Сезонная и суточная изменчивость высоты слоя перемешивания в нижней тропосфере над прибрежными территориями севера Евразии

Виноградова А.А.[1], Котова Е.И.[2], Лохов А.С.[2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
anvinograd@yandex.ru

Ключевые слова: *высота слоя перемешивания, нижняя тропосфера, сезонный ход, пространственное распределение, траектории воздушных масс, квази-однородные климатические территории, северные моря, Арктика*

Условия распространения и накопления примесей в приземном слое атмосферы в значительной степени зависят от его стабильности, которая количественно может характеризоваться высотой слоя перемешивания (ВСП). В работе по единой методике оценены средние за 2001–2021 годы значения ВСП для различных территорий России в разные сезоны в дневные и ночные часы [1]. Анализ основан на данных расчетов траекторий переноса воздушных масс в арктические районы России с помощью дисперсионной модели HYSPLIT. Приводятся значения ВСП, усредненные по площади над отдельными материковыми квази-однородными климатическими территориями и над морями Российской Арктики, а также общее пространственное распределение ВСП над этими территориями на географической сетке 1x1 градус для центральных месяцев сезонов.

Над северными (замерзающими) морями сезонный ход величины ВСП имеет минимум в теплое время года – в противоположность территориям суши, где летом ВСП максимальна. Внутрисуточные колебания высоты слоя перемешивания характеризуют нестабильность приземного слоя тропосферы более высокой частоты. В результате атмосфера в прибрежных зонах северных морей характеризуется максимальными горизонтальными градиентами ВСП, формирующими различные виды неустойчивости в воздухе и на морской поверхности. Учитывая, что прибрежная зона севера Евразии охватывает по широте почти 12 часовых поясов, можно предположить ее значимое влияние на формирование горизонтальных и вертикальных потоков вещества над Северным Ледовитым океаном (СЛО) разных временных масштабов, особенно в теплое время года.

Результаты исследования могут быть полезны для сравнительных климатических и экологических оценок различных регионов России, а также при изучении процессов формирования конвективных потоков в прибрежных зонах СЛО.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России для Института физики атмосферы А.М. Обухова РАН, № 125020501524-9 и для Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, тема № FMWE-2024-0020.

Литература

1. Одинцов С.Л. и др. // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 7. С. 549–558. DOI: 10.15372/AOO20220705
2. Локощенко М.А. и др. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 6. С. 641–650. DOI: 10.31857/S0002351521060080
3. Виноградова А.А. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 06. С. 415–421. DOI: 10.15372/AOO20250601

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Пространственная статистика и модальная структура горизонтальных неоднородностей электрического поля в вихреразрешающей модели приземного электродного эффекта

Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Климанова Е.В., Анисимов С.В.
Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия
svga@borok.yar.ru

Ключевые слова: *приземный электродный эффект, вихреразрешающее моделирование, собственное ортогональное разложение, пространственная автокорреляция*

Электрическое состояние приземного слоя атмосферы определяется ионизационно-рекомбинационными процессами, турбулентным переносом и дрейфом заряженных частиц в электрическом поле. Вблизи проводящей земной поверхности вследствие электродного эффекта формируется слой объёмного заряда, структура которого определяется взаимодействием электрических и турбулентных процессов. Вихреразрешающее моделирование (LES), сопряжённое с решением трёхмерного уравнения Пуассона для электрического потенциала, позволяет расширить классическое одномерное описание электродного эффекта и исследовать пространственную структуру электрических неоднородностей с учётом разрешённых вихревых движений и режима турбулентности.

Исследована пространственная статистика двумерных горизонтальных полей вертикальной компоненты атмосферного электрического поля E_z, полученных при нейтральной стратификации. Анализ выполнялся для центральной области 208x208 узлов с шагом 1,25 м. Для каждого временного шага рассчитывалась двумерная пространственная автокорреляционная функция (R). Центральная связная область $R \geq 1/e$ характеризовалась эллипсом, эквивалентным по вторым пространственным моментам, что позволило определить главные корреляционные масштабы $L_1 > L_2$, степень анизотропии и ориентацию большой оси [1]. Для выделения крупномасштабной организации применялось собственное ортогональное разложение (POD) [2].

Показано, что поля E_z обладают выраженной и изменчивой во времени пространственной анизотропией, определяемой преимущественно вариациями большого корреляционного масштаба L_1. Корреляционные структуры демонстрируют устойчивую тенденцию ориентироваться поперёк крупномасштабной компоненты E_z, выделенной методом POD. Обнаружена положительная связь между мгновенной энергетической долей двух ведущих мод и уменьшением корреляционного масштаба после их удаления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-17-00053-П).

Литература

1. Chorti A., Hristopolous D.T. Nonparametric identification of anisotropic (elliptic) correlations in spatially distributed data sets. IEEE Transactions on Signal Proc. 2008. 56(10), 4738–4751. DOI: 10.1109/TSP.2008.924144
2. Berkooz G., Holmes P., Lumley J.L. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. Ann. Rev. Fluid Mech. 1993, 25, 539–575. DOI: 10.1146/annurev.fl.25.010193.002543

Прогноз условий образования замерзающих осадков по данным профилемера МТП-5 методами машинного обучения

Гафуров И.А.[1,2], Репина И.А.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
gafuroviso@yandex.ru

Ключевые слова: *замерзающие осадки, машинное обучение*

Замерзающие осадки (переохлаждённый дождь и морось) – опасное явление, ведущее к гололёду на дорогах, линиях электропередачи и в аэропортах, и одно из наименее успешно прогнозируемых. Их образование связано с особой стратификацией нижней атмосферы – тёплым слоем над приземным холодным слоем, – которую можно диагностировать по вертикальному профилю температуры. Профилемер МТП-5 измеряет такой профиль непрерывно, с высоким временным разрешением, что открывает возможность автоматического выявления опасных условий.

Цель работы – оценить применимость методов машинного обучения для идентификации условий образования замерзающих осадков по данным МТП-5 и автоматической метеостанции. В качестве признаков используются профиль температуры 0–1000 м с шагом 50 м, температура и относительная влажность у поверхности. Разметка выборки выполняется по физическому критерию, основанному на наличии и толщине холодного и тёплого слоёв. Профили МТП-5 совмещаются с данными метеостанции по ближайшему времени измерения. Сравниваются логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг и многослойный перцептрон; гиперпараметры подбираются с помощью Optuna. Качество оценивается по ROC-AUC, полноте и точности с учётом сильной несбалансированности классов, исследуются устойчивость моделей к шуму в признаках и значимость признаков.

Оценка погрешностей одномерного представления лесного полога при расчете поглощения коротковолновой радиации

Гибадуллин Р.Р.[1], Ильясов Д.В.[2], Левашова Н.Т.[1], Ольчев А.В.[1,2]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*
ravil00121@mail.ru

Ключевые слова: *лесной полог, перенос солнечной радиации, коротковолновая солнечная радиация, трехмерное моделирование, одномерные модели, поглощение радиации, фотосинтетически активная радиация, ближняя инфракрасная радиация, листовой индекс (LAI), наземное лазерное сканирование, метод дискретных ординат*

Пространственная структура лесного полога существенно определяет распределение поглощенной солнечной радиации, а также тепловой, водный и углеродный обмен лесов [2]. В моделях поверхности суши и климата широко применяются горизонтально однородные (1D) схемы переноса излучения, однако количественные ошибки горизонтального осреднения полога изучены недостаточно.

В работе выполнены расчеты с использованием трехмерной модели переноса излучения, основанной на методе дискретных ординат [1]. Структура кроны одного дерева восстановлена по данным лазерного сканирования с помощью БПЛА сосны обыкновенной (Pinus sylvestris). На основе трёхмерной структуры кроны сформированы модельные древостои с LAI 0.5-7.5. Для исключения влияния различий численных алгоритмов расчеты для 3D- и 1D-полога проводились одной моделью с периодическими граничными условиями. Рассчитаны поглощение ФАР (фотосинтетически активной радиации) и БИКР (ближней инфракрасной радиации) для разного времени суток.

Получено, что в разреженных древостоях (LAI $\leq$ 1.5) 1D-представление завышает поглощение ФАР растительностью на 6-8% и занижает поступление радиации к почве. Для БИКР различия достигают 10-12%, а при LAI = 0.5 знак эффекта меняется. При LAI $\geq$ 5 интегральные различия не превышают 1%. Однако 1D-модель искажает вертикальное распределение: в верхних ярусах поглощение завышается, в нижних занижается. При LAI = 7.5 локальная ошибка для ФАР достигает +12.5 Вт м$^{-2}$ в верхней части кроны и -5 Вт м$^{-2}$ в нижней.

Экспериментальные исследования в ХМАО-Югре проведены с использованием инфраструктуры карбонового полигона «Мухрино» в рамках государственного задания «Карбоновые полигоны» (рег. № 122122800014-7).

Литература

1. Levashova N., Lukyanenko D., Mukhartova Y., Olchev A. Application of a Three-Dimensional Radiative Transfer Model to Retrieve the Species Composition of a Mixed Forest Stand from Canopy Reflected Radiation // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Art. 1661.
2. Ross J. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. The Hague ; Boston ; London : W. Junk, 1981. 391 p. (Tasks for Vegetation Science ; vol. 3). ISBN 90-6193-607-1.

Восстановление тензора турбулентного обмена и оптимизация нижнего граничного условия в атмосферном пограничном слое

Гордин В.А.[1,2,3], Ефременко Д.С.[1]
[1]*НИУ "Высшая школа экономики", Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[3]*Университет Иннополис, Иннополис, Россия*
vagordin@mail.ru

Ключевые слова: *тензор турбулентного обмена, модель Акерблома–Экмана, шероховатость, условие Навье, обратная задача*

Рассматривается обратная задача восстановления тензора турбулентного обмена в атмосферном пограничном слое на основе обобщённой модели Акерблома–Экмана. Для решения обратной задачи использовался численный алгоритм с использованием компактной разностной схемы.
Исследование основано на архиве из 155 000 радиозондовых профилей ветра за 2019–2025 гг. Показано, что тензорное описание позволяет уменьшить невязку модели примерно на 10%. Установлены зависимости коэффициентов турбулентного обмена от сезона, времени суток, географической широты, температурной стратификации, числа Ричардсона и шероховатости поверхности. Предложена оптимизация нижнего граничного условия третьего рода, существенно улучшающая воспроизведение скорости и направления ветра вблизи поверхности. Полученные результаты создают основу для совершенствования параметризаций турбулентности в моделях прогноза погоды.

Литература

1. Bykov, Philipp L. and Gordin, Vladimir A. Complex turbulent exchange coefficient in Akerblom–Ekman model" Journal of Inverse and Ill-posed Problems, vol. 32, no. 2, 2024, pp. 199-211.
2. V. A. Gordin, D. S. Efremenko. “Turbulent Exchange Tensor in the Atmospheric Boundary Layer: An Inverse-Problem Approach Using Radiosonde Wind Observations with High Vertical Resolution”. Boundary-Layer Meteorology. 2026, Vol.192, No 51.
https://link.springer.com/article/10.1007/s10546-026-00999-0

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Новый подход к прогнозированию смерчеопасности на основе стохастического дифференциального уравнения Ланжевена

Гостев К.С.[1,2], Сурков Я.А.[3,4], Щелканов А.И.[3], Xi Liu[4]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Омский государственный технический университет, Омск, Россия*
[4]*Yanshan University, Qinhuangdao, China*
k.gostev@ifaran.ru

Ключевые слова: *торнадо, смерч, турбулентность, стохастика, прогнозирование*

Представлен новый подход диагностики потенциала смерчегенеза, принимая во внимание взаимодействие между турбулентными подсеточными процессами в планетарном пограничном слое с более медленно изменяющимися, детерминированными крупномасштабными факторами окружающей среды, благоприятных для формирования систем глубокой конвекции.

Для интегрирования стохастического дифференциального уравнения в интерпретации Стратоновича применяется схема Хойна. Пространственная локализация стохастического воздействия определяется детерминированным индексом и масками, характеризующими условия развития смерчеопасной конвекции. Пространственная корреляция случайных возмущений задаётся гауссовой фильтрацией, а неопределённость начального состояния исследуется с помощью ансамбля из 100 реализаций с аддитивными (не зависящими от начального состояния) и мультипликативными (зависящими от него) возмущениями.

Дифференциальное уравнение Ланжевена не выводится аналитически из исходных динамических уравнений, описывающих незыблемые законы, а представляет собой феноменологическую стохастическую модель. Члены уравнения отражают лишь ограниченный набор известных характеристик, рассчитываемых с помощью модели WRF ARW из первых принципов, которые были получены исходя из фактов, основанных на физических законах и эмпирических данных, изложенных в современных исследованиях касательно процессов формирования торнадо.

На основе верификации, проведенной по результатам моделирования с различными начальными условиями на датах с опасными явлениями на территории России и Беларуси 2026 года, были получены некоторые результаты при сравнении нового параметра с классическим индексом updraft helicity. Несмотря на то, что стохастический параметр Ланжевена проигрывает ему в пространственной точности локализации, он имеет преимущество в большой селективности, которая приводит к уменьшению количества ложных тревог.

Описанную методику можно улучшать и совершенствовать, проверять на других мезомасштабных моделях.

Зависимость интегральных характеристик приземного электродного эффекта от турбулентного режима по данным численного моделирования

Дмитриев Э.М.
Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия
skeptikxxi@mail.ru

Ключевые слова: *приземный электродный эффект, турбулентная диффузия, численное моделирование*

Электродный эффект в приземной атмосфере в условиях «хорошей погоды» обусловлен отталкиванием от отрицательного электрода (земной поверхности) одноименно заряженных аэроионов и приводит к зависимости электрических характеристик приземной атмосферы от высоты z. Одномерная краевая задача, описывающая приземный турбулентный электродный эффект, включает уравнение Гаусса для электрического поля атмосферы E(z) и уравнения переноса для концентраций лёгких аэроинов обоих знаков $n_{+(z)}$ и $n_{-(z)}$, учитывающие их образование, рекомбинацию, дрейф в электрическом поле и турбулентную диффузию. Интенсивность ионообразования задаётся постоянной по высоте. Зависимость коэффициента турбулентной диффузии K от высоты аппроксимируется степенной функцией $K(z)=K_0z^m$. Граничные условия задаются на высоте шероховатости земной поверхности h ($n_{+(h)}=n_{-(h)}=0$) и на эффективной бесконечности (равновесные концентрации $n_\infty=n_{+(\infty)}=n_{-(\infty)}$ и внешнее электрическое поле $E_\infty=E(\infty)$) [1].

Получены численные решения краевой задачи при нейтральной (m=1) и неустойчивой (m=4/3) стратификаций для различных значений K_0. Исследовано влияние турбулентного режима на формирование высотных профилей $n_{+(z)}$, $n_{-(z)}$ и E(z) и на интегральные характеристики электродного эффекта: величину электродного эффекта $F=E(h)/E_\infty$, поверхностную плотность накопленного в приземном слое электрического заряда $\sigma=\varepsilon_0(E(h)-E_\infty)$, высоту электродного слоя L, выше которого электрические характеристики атмосферы можно считать однородными. За высоту электродного слоя была принята высота L, ниже которой сосредоточено 80% приземного электрического заряда атмосферы, так что $E(L)=E_\infty+0.8(E(h)-E_\infty)$. Показано, что с ростом K_0 значения F и σ несколько уменьшаются, а значение L сильно возрастает как для нейтральной, так и для неустойчивой стратификации атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2025-0049.

Литература

1. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог. Издательство ТРТУ, 1998. 123 с.

Об изменчивости периодических субмезомасштабных структур в устойчивом атмосферном пограничном слое по данным многоточечных содарных измерений

Зайцева Д.В.[1], Люлюкин В.С.[1,2], Кузнецов Д.Д.[1], Каллистратова М.А.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
zaycevadv@gmail.com

Ключевые слова: *устойчивый атмосферный пограничный слой, содар, когерентные структуры*

Работа посвящена анализу изменчивости субмезомасштабных структур в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое. Наблюдения выполнялись в летнее время над однородной степной поверхностью с помощью трёх однотипных содаров и микробарографов, разнесённых по горизонтали примерно на 300 м. Такая конфигурация измерительной сети позволила не только выявить структуры, распространяющиеся в нижнем 300-метровом слое, но и оценить пространственно-временную динамику путём сопоставления данных с разных пунктов.

Путём визуального анализа высотно-временных развёрток содарного эхо-сигнала (эхограмм) были выделены эпизоды с различной вертикальной структурой. Их периоды не превышали 5 минут, а длительность существования – нескольких часов. Для всех отобранных эпизодов проведена оценка изменения как их спектральных характеристик, так и дисперсии вертикальной компоненты скорости ветра. При помощи методов когерентного анализа получены оценки согласованности колебаний внутри измерительной сети. Долгоживущие структуры (от одного до нескольких часов) на эхограммах обычно имеют вид наклонных полос или валов в приземном инверсионном слое. Проходя через измерительную сеть, они меняются слабо. Короткоживущие образования (от одного до нескольких десятков минут) представлены валами в слое, приподнятом над инверсионным; по мере распространения через измерительную сеть такие валы значительно трансформируются и могут даже обрушиться.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 25-17-00346.

Радиационно-конвективная модель тропосферы с априорным заданием высотного распределения коэффициента турбулентного обмена

Канцырев Б.Л.
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
boris.kantsyrev@mail.ru

Ключевые слова: *трёхкомпонентная модель атмосферного столба, модель Монина-Обухова, модель Блэкадара*

Аннотация. Представлена радиационно-конвективная модель (РКМ) тропосферного и приводного атмосферного слоя, содержащего влажный воздух с каплями воды. Влияние солнечной радиации учтено в рамках двух-потоковой модели с интегральными параметрами поглощения, зависящими от массовой доли водяного пара.
Рассмотрен тропосферный слой, взаимодействующий с приповерхностным океанским слоем ветрового перемешивания. В расчётах показано влияние параметров и конвективных волновых свойств модели на нестационарные решения.
Введение. Предложена РКМ, в которой атмосферный столб представлен в виде однородной по горизонтали среды с частицами - конденсационными центрами, концентрация которых задана. Высотное распределение коэффициента турбулентного обмена задано на основе сопряжения модели приземного слоя Монина-Обухова и модели Блэкадара для земного пограничного слоя.
В соответствии с представлениями механики многофазных сред атмосферный воздух моделируется как среда, образованная тремя взаимопроникающими континуумами; паровоздушной смесью и каплями, где скорости и температуры различны.
Заключение. Существенно, что представленная модель не содержит априорных предположений о структуре атмосферного столба. Полученные результаты для высотных распределений параметров атмосферы – качественно соответствуют наблюдаемым. Разрывные решения позволяют интерпретировать возникновение нижней границы облачности в рамках представлений механики многофазных сред об одномерных нестационарных и термодинамически - неравновесных конвективных процессах.

Результаты анализа вариабельности приземного атмосферного электрического поля и плотности тока на основе разнесённых наблюдений

Климанова Е.В., Галиченко С.В., Анисимов С.В.
Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия
klimanova@borok.yar.ru

Ключевые слова: *атмосферное электрическое поле, метод главных компонент, когерентность*

Формирование пространственно неоднородных распределений электрического заряда в приземном слое атмосферы определяется совокупностью процессов, связывающих радиоактивность земной поверхности, ионизацию воздуха и атмосферную электродинамику [1]. Одним из источников ионизации являются естественные радионуклиды земной коры — прежде всего долгоживущие изотопы урана, тория и калия и продукты их распада. Особую роль играют изотопы радона, образующиеся в рядах распада урана и тория и проникающие из почвы в атмосферу, что создаёт распределённый источник ионизации непосредственно в воздухе. Появляющиеся в результате лёгкие ионы существуют несколько десятков секунд, однако присоединение к аэрозолям приводит к образованию долгоживущих кластеров. Стоит отметить, что в условиях биполярной зарядки различия в подвижности и сечении взаимодействия ионов с различными аэрозольными частицами могут приводить к асимметрии зарядового распределения [2]. Турбулентный перенос, конвекция и электрический дрейф формируют пространственно-временные структуры заряда, которые легко фиксируются наземной аппаратурой.

В работе синхронные измерения вертикальной составляющей электрического поля, полученные системой пространственно разнесённых электростатических флюксметров, сопоставлялись с измерениями плотности тока, выполненными токовым коллектором. Анализ был направлен на выявление статистических различий между спокойными и возмущёнными режимами атмосферного электрического поля. Метод главных компонент использовался для выделения пространственно общей компоненты поля и оценки её вклада в дисперсию данных. Анализ когерентности характеризовал частотную согласованность вариаций общей моды поля и плотности тока, а анализ детрендированных остатков выявил усиление негауссовости и более тяжёлые хвосты распределений в возмущённых режимах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053-П).

Литература

1. Golubenko K., Rozanov E., Mironova I., Karagodin A., Usoskin I. Natural Sources of Ionization and Their Impact on Atmospheric Electricity // Geoph. Res. Lett. 2020. V 47. P. e2020GL088619.
2. Lee H.M., Kim C.S., Shimada M., Okuyama K. Effects of Mobility Changes and Distribution of Bipolar Ions on Aerosol Nanoparticle Diffusion Charging // Journ. of Chem. Engin. of Japan. 2005. V. 38. P. 486-496.

Масштабное преобразование как метод идентификации механизма переноса пылевого аэрозоля

Козлов Н.О.[1,2], Малиновская Е.А.[1], Калинин С.Д.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
nikitagarbuzko@gmail.com

Ключевые слова: *пылевой аэрозоль, конвективный вынос, термики, масштабное преобразование, приземный слой, аридные территории*

Общепринято, что пылевой аэрозоль на аридных территориях генерируется за счет ветрового воздействия на поверхность, способствующего подскокам (сальтациям) частиц (эоловый механизм). При умеренном и слабом ветре в условиях сильного прогрева поверхности (до 60 ºС) на эмиссию пыли влияет приповерхностный градиент температур [1]. Из-за термической неоднородности возникают термики – локальные восходящие потоки теплого воздуха (термический механизм).

Для анализа данных предполагали, что возможны два типа термических структур: пыль в ядре поднимающегося термика (воздух прогревается за счет тепловых потоков от поверхности) или пылевой аэрозоль, обладая собственной теплоемкостью, влияет на локальный прогрев. При определении причины и следствия прогрева объема воздуха полагали, что будут различаться пространственно-временные масштабы локальных изменений для рядов температуры и концентрации.

Применялся метод масштабного преобразования [2]. Данные полевых измерений ИФА РАН анализировались на высотах 20, 40 и 80 см для конвективного (ветер ≤1 м/с на высоте 2м) и ветрового (≥6 м/с) режимов. Ряд концентрации пыли сравнивался с растянутым/сжатым по времени рядом температуры, смещенным по времени на dt (из корреляционного анализа). Подбирался коэффициент k, при котором корреляция достигает максимума (k>1 – температурный всплеск длиннее, k<1 – наоборот).

В конвективном режиме кривые корреляционной функции гладкие, с одним широким максимумом при k>1 – пыль переносится термиком. В ветровом режиме кривые более хаотичны, максимумы при k=1 указывают на синхронность и возможное влияние взвешенной пыли на локальные изменения температуры воздуха.

На высоте 20 см пыль связана с конкретным термиком, который её поднял. Для уровня 40 см картина переходная. Выше (на 80 см) к локально поднятой пыли добавляется фоновая менее прогретая. Преобладают ситуации, когда локальный скачок значений концентрации оказывается длиннее температурного.

Исследования выполнены при поддержке РНФ, №25–17–00346.

Литература

1. Chkhetiani O.G. et al. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model. Atm. Chemistry and Physics. 2012, Vol. 12, pp. 5147–5162.
2. Козлов Н.О., Калинин С.Д., Малиновская Е.А. Структуры корреляционных связей при конвективном выносе пылевого аэрозоля. Волны и вихри в сложных средах: сб. мат. 16-й Междунар. конференции-школы молодых ученых. –М.: ООО «ИСПО-принт», 2025. — С. 122–125.

Неопределенность высоты и радиационной температуры нижней границы облачности из-за влияния подоблачной дымки

Кочин А.В.
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия
amarl@mail.ru

Ключевые слова: *высота нижней границы облаков, подоблачная дымка, облакомер, инфракрасная температура*

Сравнения облакомеров, выполненные в ВМО, показали систематические различия в показаниях облакомеров разных производителей. Причиной являются разные подходы к определению высоты нижней границы облачности (НГО). При контрольных измерениях по времени полета радиозонда высота НГО определяется как уровень, на котором оболочка начинает туманиться, но не как высота полного исчезновения оболочки из поля зрения. Так как оболочка начинает туманиться на нижней границе, то возникает неопределенность учета толщины подоблачной дымки, потому что отражение лазерного источника происходит как от нижней, так и от верхней ее границы. Например, в конкретном запуске радиозонда на АЭ Долгопрудная оболочка начала туманиться на высоте около 800 метров и исчезла из поля зрения на высоте 1200 метров. Облакомер Vaisala CL-31 в а/п Шереметьево показал резкие изменения высоты НГО в соседние сроки наблюдений, а именно 780 метров в момент запуска и 1320 метров в соседний срок. Инфракрасная температура НГО, измеренная пирометром, соответствовала температуре воздуха на высоте 950 метров, что ниже высоты исчезновения оболочки, но выше высоты, на которой оболочка начинает туманиться. При наличии облачности нижнего яруса повторяемость подобной ситуации достаточно высока. Литературные данные (Беспалов) определяют типичную вертикальную протяженность подоблачной дымки в 100 – 150 метров, что заметно отличается от результатов наших наблюдений. Возникновение протяженной подоблачной дымки должно привести к изменению эффективной ИК-температуры НГО, что необходимо учитывать при моделировании процессов радиационного обмена между облаками и подстилающей поверхностью. При анализе расчете ИК температуры НГО по данным лазерных облакомеров и фиксированном вертикальном градиенте температуры также нужно учитывать наличие облачной дымки (Махотина и др.). Изменчивость ИК температуры НГО по пирометру заметно превышает изменчивость высоты НГО по облакомеру.

Литература

1. https://mgmtmo.ru/edumat/wmo/arch_21/8_I_15.pdf
2. И. А. Махотиной и др. «Радиационный эффект облачности над морским льдом в Арктике во время полярной ночи по данным дрейфующих станций “Северный Полюс”-37, 39, 40» «Известия РАН. Физика атмосферы и океана» (ФАО) 2021 г. № 5, с. 524–534
3. Беспалов Д.П. К определению понятия «высота нижней границы облаков». – Труды ГГО, 1975, вып.345, с.3-12

Типизация форм волн Кельвина–Гельмгольца в устойчивом АПС по композитному анализу содарных данных

Люлюкин В.С.[1,2], Зайцева Д.В.[1], Каллистратова М.А.[1], Кузнецов Д.Д.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
lyulyukin@ifaran.ru

Ключевые слова: *содары, когерентные структуры, устойчивый атмосферный пограничный слой*

Представлены результаты типизации когерентных структур типа волн Кельвина–Гельмгольца (ВКГ) в устойчивом атмосферном пограничном слое (АПС) по данным многолетних содарных измерений с применением композитного анализа. Метод основан на ансамблевом осреднении повторяющихся квазипериодических структур на эхограммах доплеровского содара: участки данных синхронизируются по фазе волны, после чего осредняются и интерполируются. Это позволяет восстановить усреднённую двумерную структуру поля скорости ветра внутри волнового слоя, сглаживаемую при стандартном временном осреднении.

Использованы данные содарных измерений на Цимлянской научной станции ИФА РАН (Ростовская область) и Звенигородской научной станции (Московская область). Измерения выполнялись трёхантенным содаром высокого разрешения (вертикальное разрешение 5–20 м, период зондирования 2–10 с). Для анализа было отобрано около двух десятков эпизодов ВКГ. Получены данные о периодах волн, вертикальных масштабах волнового слоя, амплитудах возмущений скорости и величине сдвига ветра. Выделены характерные конфигурации композитных структур (наклонные полосы, замкнутые «кошачьи глаза» и их вариации). Для каждой конфигурации по композитному полю скорости выполнена оценка параметров циркуляции воздушных масс в волновом слое.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-17-00060.

Литература

1. Lyulyukin V., Kouznetsov R., Kallistratova M. The composite shape and structure of braid patterns in Kelvin-Helmholtz billows observed with a sodar // J. Atmos. Oceanic Technol. 2013. 30. P. 2704–2711.
2. Petenko I., Casasanta G., Kallistratova M., Lyulyukin V., et al. Kelvin–Helmholtz Billows in the Rising Turbulent Layer During Morning Evolution of the ABL at Dome C, Antarctica // Boundary-Layer Meteorology. 2023. 187. P. 163–192.

Электростатические пылевые структуры в ветро-конвективных условиях

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
elen_am@inbox.ru

Ключевые слова: *электризация пылевых частиц, напряженность электрического поля, корреляционные связи, всплесковые изменения, спектр*

Ветропесчаные процессы на аридных территориях являются источником пылевого аэрозоля (размеры 0.1-5 мкм) в атмосфере. Взаимодействие и соударения с поверхностью крупных частиц (~70–150 мкм) в результате подскоков (сальтаций) у поверхности способствуют их электризации [1]. Эта приповерхностная динамика способна вносить локальные изменения в фиксируемую приборами величину электрического поля [2]. В условиях значительного нагрева поверхности и приповерхностных градиентов температур конвективные движения оказывают существенное влияние на процесс генерации пылевого аэрозоля [3, 4], влияющий на изменения электрического поля.

Комплексные полевые измерения (температура и скорости ветра (1000 Гц), напряженность электрического поля (200 Гц) и концентрация пылевого аэрозоля (10 Гц)) в засушливых условиях (2022–2025 гг.) позволили выявить ряд следующих эффектов.

Наблюдаются синхронные колебания концентрации аэрозоля, температуры и напряженности электрического поля (устойчивые корреляционные связи, всплесковые изменения) [5].

На масштабах секунд, их долей и минут для рассматриваемых четырех рядов данных выявляются когерентные структуры, в частности, для температуры и скорости в [4, 5].

Для спектров температуры, скорости, концентрации и напряженности электрического поля, помимо известного наклона -5/3, наблюдаются и другие наклоны -1, -3 и -1/3, связанные с конвективными процессами и структурами. Характерный для пульсаций напряженности электрического поля спектр имеет наклон «-3», в условиях интенсификации генерации пыли появляются наклоны «-5/3», «-1» и «-1/3».

Статистические свойства (формы кривых распределений, наклоны структурных функций и спектров) в наибольшей степени сходны для пульсаций температуры, скорости воздушных потоков и концентрации пылевого аэрозоля. Указанные характеристики для напряженности электрического поля отличаются в значительной степени, что определяется наличием накопительного эффекта.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-17-00346).

Литература

1. Malinovskaya E. A. et al. // Doklady Earth Sciences. — 2022. — 502(1). — P. 59-67.
2. Kok J.F., Lacks D.J. // Physical Review E. — 2009. — V. 79. — №5. — P. 051304.
3. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G., Azizyan G. V. // Doklady Earth Sciences. — 2024. — 516(1). — 888-895.
4. Malinovskaya, E.A., et al. // Boundary-Layer Meteorology. — 192(1). — 2026. — P.9.
5. Малиновская Е.А. и др. // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. — 2026. — Т. 62. — № 4. — С. 635–657

Точность определения высоты нижней границы температурной инверсии по данным радиометрических измерений

Миллер Е.А.[1], Князев А.К.[1], Лукьянов А.Н.[1], Баранов Н.А.[2], Лезина Е.А.[3]
[1]*Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия*
[2]*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия*
[3]*ГПБУ Мосэкомониторинг, Москва, Россия*
rpo.attex@yandex.ru

Ключевые слова: *температурные профилемеры, инверсии температуры, радиояркостные температуры, статистическая регуляризация, загрязнение атмосферы, гауссова модель факела*

Накопление и перенос газовых примесей от источников в атмосфере управляется уравнением турбулентной диффузии. Контроль в реальном времени условий распространения газовых примесей и зон с повышенным уровнем загрязняющих веществ в приземном слое позволяет избежать критических концентраций, которые формируются у поверхности вблизи источников.

Решение уравнения турбулентной диффузии в работах Тейлора (1921) и Сеттона (1953) дано с предложением распределения примесей по гауссовскому закону. Версия формулы 3х мерных полей концентрации с учетом отражения от земли и инверсии (Clarke, 1979), позволяет проводить расчеты в реальном времени о связи характеристик эмиссий (высота, мощность) и условий распространения (параметры инверсии и ветер в приземном слое) с уровнем концентрации ЗВ вблизи источников.

Температурные профилемеры МТР-5 (Troitsky, 1993) – источник непрерывных данных о динамике температурной стратификации в приземном земном слое атмосферы, которые позволяют определять эффективную высоту источника с учетом температуры эмиссии и контролировать высоту нижней границы температурной инверсии над источниками для расчета полей концентраций, с учетом отражения выброса от инверсионного слоя по измеренным характеристикам условий распространения.

Точность определения высоты нижней границы инверсионного слоя температурными профилемерами обусловлена характеристиками технологии измерения угломестного сканирования антенной системы, стабильностью калибровок СВЧ приемника и точностью решения обратной задачи восстановления профиля термодинамических температуры по измеренному спектру радиояркостных температур.

В докладе дано описание значимых характеристик технологии измерений, даны оценки преимуществ выбора метода статистической регуляризации (Turchin, 1970) для решения обратной задачи восстановления профиля температуры и представлены результаты сравнений определения высоты нижней границы инверсионного слоя по данным температурных профилемеров и данным радиозондирования.

Литература

1 G.I.Taylor. Diffusion by Continuous Movement. 1921
2 O.G.Sutton. Micrometeorology. McGraw-Hill, NY 1953
3 R.H.Clarke. The first report of a Working Group on Atmospheric Dispersion: a model for short and medium dispersion of radionuclides released to the atmosphere. UK 1979
4 A.V.Troitsky, K.P.Gaikovich, V.D.Gromov, E.N.Kadygrov, A.S.Kosov, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 31, 1 1993
5 V.F.Turchin, V.P. Kozlov, M.S.Malkevich, Sov. Phys. Usp, 13, 6 1970

Аналитическая модель распределения средней скорости ветров в атмосферном пограничном слое

Миронов В.Л., Миронов С.В.
Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
mironov@ipmras.ru

Ключевые слова: *атмосферный турбулентный пограничный слой, профили скорости ветра, струйные течения в нижних слоях атмосферы, бризы, ураганы*

Предлагается теоретическая модель для описания вертикального распределения средней скорости ветра в пограничном слое атмосферы, основанная на уравнениях для вихревых турбулентных потоков [1,2]. Для плоского установившегося турбулентного потока модель сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений для средней скорости потока и средней угловой скорости вращения вихрей. Данная система имеет аналитические решения, представляющие собой комбинацию трех экспоненциальных функций с различными пространственными масштабами, характеризующими вихревую вязкость, а также спадание продольного градиента давления и угловой скорости вращения вихрей. В качестве примеров рассмотрены вертикальные профили скорости ветра в нижних слоях тропосферы, соответствующие низкоуровневым струям, бризам и ураганам. Во всех рассмотренных случаях модельные профили скорости хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Литература

1. V.L. Mironov, S.V. Mironov, Vortex model of plane turbulent air flows in channels, Advances in Aerodynamics, 6:8 1-17 (2024).
2. V.L. Mironov, S.V. Mironov, Vortex model of turbulent flows in boundary layers, Journal of Mathematical Sciences, 300(6), 654-663 (2026).

Анализ энергетики прибрежных ветров по данным измерений и LES-моделирования

Новикова Е.В.[1], Репина И.А.[1,2,3], Мортиков Е.В.[2,3,4]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия*
[3]*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия*
[4]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
e.novikova@ifaran.ru

Ключевые слова: *пограничный слой атмосферы, микрометеорологические измерения, LES-моделирование, прибрежная зона*

Турбулентность в пограничном слое атмосферы лежит в основе обмена теплом, влагой и импульсом между атмосферой и подстилающей поверхностью, формирует приземный метеорологический режим, влияет на образование низких облаков и туманов, а также на рассеивание загрязняющих веществ. В связи с этим адекватный учёт турбулентного перемешивания в атмосферных моделях, применяемых для численного прогноза погоды и климатического моделирования, представляет собой принципиально важную задачу.

В данной работе были использованы данные измерений метеорологической мачты, расположенной на берегу Балтийского моря в Калининградской области, а также данные модели прямого численного моделирования турбулентности (Large-Eddy Simulation, LES), разработанной в НИВЦ МГУ.

Для оценки распределения по масштабам энергии турбулентности был проведен анализ энергетических спектров, полученных с помощью разложения Фурье временного ряда флуктуаций скорости ветра, полученных по высокочастотным данным акустического анемометра и по модельным расчетам. Были рассмотрены случаи с устойчивым ветром с суши и с моря. Спектральный анализ показал наличие ярко выраженных крупномасштабных структур, несущих большой вклад в энергию турбулентности, при ветре с суши.

Для количественной оценки вклада в напряжение Рейнольдса и поддержание турбулентности различных типов движений был выполнен квадрантный анализ. Он показал, что при устойчивом ветре с суши наибольшее попадание точек пришлось на 2 ($u'<0$ и $v'>0$) и 4 ($u'>0$ и $v'<0$) квадранты, что говорит о наличии процессов, вносящих наибольший вклад в турбулентность. При ветре с моря распределение по квадрантам оказалось равномерным, основная масса точек сосредоточена около пересечения координат, из чего следует равномерный вклад процессов в движение и слабая возможность развития турбулентности. Таким образом, анализ показал значительные различия в структуре энергетики прибрежных ветров различного направления.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-17-00155.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Технология автоматизированного создания растровых баз данных параметров городской среды для бесшовного метеорологического моделирования

Окунева В.В.[1], Самсонов Т.Е.[1,3], Варенцов М.И.[1,2,3]
[1]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия*
[3]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
okuneva.12@list.ru

Ключевые слова: *параметры городской застройки и подстилающей поверхности, городские каньоны, многоканальная растровая база данных, машинное обучение, метеорологическое моделирование*

Для корректного описания взаимодействия городской застройки и атмосферы необходимы детальные пространственные данные о морфометрии зданий и подстилающей поверхности. Состав этих данных зависит от масштаба моделей: на микромасштабе нужна геометрия отдельных зданий, на более грубых — параметры модельных абстракций. Глобальный согласованный набор данных, содержащий все необходимые параметры, отсутствует, а подготовка таких данных остаётся трудоёмким процессом. Поэтому актуальной задачей является разработка технологии автоматизированного расчёта параметров городской застройки и подстилающей поверхности для метеорологического моделирования.

В работе используется векторная база Overture Maps, интегрирующая несколько источников. Для характеристики подстилающей поверхности применяются карта наземного покрова ESA WorldCover, карты локальных климатических зон WUDAPT, цифровые модели поверхности и рельефа. Важной частью исследования стало внедрение модели машинного обучения для восстановления высот зданий на основе градиентного бустинга [1].

Методика реализована в виде модульной Python-библиотеки с поддержкой сохранения состояния вычислений и гибкой настройкой через конфигурационный файл, что позволяет применять ее для различных территорий. Результатом является многоканальный растр высокого разрешения (от 2 до 5 м), содержащий тринадцать параметров о типах земельного покрова и геометрии городской застройки. Данные могут использоваться напрямую в микромасштабных моделях, явно разрешающих отдельные здания, либо агрегироваться по ячейкам мезомасштабных моделей, что обеспечивает бесшовный переход между моделями разного масштаба. Методика апробирована на нескольких городах России и мира, включая Москву, Апатиты, Йоханнесбург и Пекин.

Разработка технологии выполнена при поддержке проекта РНФ №26-77-10066. Создание баз данных для городов Апатиты и Йоханнесбург выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2026-229.

Литература

1. Okuneva V.V., Varentsov M.I., Samsonov T.E. Building Height Reconstruction Using Machine Learning and ArcticDEM Digital Surface Model // Moscow University Physics Bulletin. — 2025. — Vol. 80. — P. 1176–1183.

Исследования энергетического баланса подстилающей поверхности архипелага Земля Франца-Иосифа по данным автономной метеорологической станции на покровном леднике в августе 2026 г.

Пашкин А.Д., Репина И.А., Шестакова А.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
artemp@ifaran.ru

Ключевые слова: *покровный ледник, Земля Франца-Иосифа, измерения теплового баланса, модель поверхностного баланса массы ледника IGRICE*

В докладе представлены результаты измерений на архипелаге Земля Франца-Иосифа, остров Земля Александры, 80° с. ш. 48° в. д. Данные получены в рамках комплексной экспедиции Русского географического общества на архипелаг Земля Франца-Иосифа (2 этап 2026 г.) 18.08-06.09.2026 на базе «Омега» национального парка «Русская Арктика».
Впервые после Международного геофизического года (1957-1959 г.) (Гросвальд и др. 1973) проведены подробные метеорологические измерения непосредственно на ледниках Земли Франца-Иосифа. На языке ледника Кропоткина на высоте 155 м над уровнем моря была установлена автоматическая метеостанция САМ-ГМ2 (ИП Кураков, г. Томск) с двумя вертикальными уровнями и радиометр CNR-4 (Kipp&Zonen, Нидерланды).
Эти измерения позволили рассчитать все компоненты теплового баланса ледниковой поверхности, а результирующий слой стаивания рассчитан с помощью модели поверхностного баланса массы ледника IGRICE (Toropov et al. 2025). Полученный слой стаивания (5,6 см за 8 суток) оказался выше измеренного по абляционным рейкам в районе метеостанции (4 см).
Ошибка слоя стаивания может быть связана как с погрешностью измерений, так и с неопределенностью некоторых параметризаций модели. В частности, турбулентные потоки тепла рассчитываются в модели по стандартным балк-формулам для устойчивой стратификации с использованием постоянного значения параметра динамической шероховатости и параметризации Казакова и Лыкосова для термической шероховатости. В то же время измерения на других ледниках Арктики свидетельствуют о том, что изменчивость параметров шероховатости очень велика и требует учета особенностей приземного слоя над ледником. Поэтому в будущем планируется исследование турбулентного режима ледника Кропоткина и проведение пульсационных измерений.

Литература

1. «Оледенение Земли Франца-Иосифа» (авторы: М. Г. Гросвальд, А. Н. Кренке, О. Н. Виноградов и др.; под ред. Г. А. Авсюка и В. М. Котлякова; изд-во «Наука», 1973 г.)
2. Toropov, P. A., Shestakova, A. A., Muraviev, A. Y., Drozdov, E. D., & Poliukhov, A. A. (2025). The New IGRICE Model as a Tool for Studying the Mechanisms of Glacier Retreat. Climate, 13(12), 248.

Роль радиационного трения в формировании реакции океана на прохождение тропического циклона

Пиваев П.Д.[1,2], Кудрявцев В.Н.[1,2]
[1]*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
[2]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
pivaev.pavel@mhi-ras.ru

Ключевые слова: *тропический циклон, перемешанный слой, радиационное трение, аномалии температуры поверхности океана, апвеллинг*

В данной работе исследуется влияние излучения коротких внутренних волн с нижней границы перемешанного слоя (ПС) в толщу океана на отклик последнего на воздействие тропического циклона (ТЦ). Для этого используется упрощённая модель океана, предложенная Кудрявцевым и др. (2019), в сочетании с данными наблюдений.

Указанное излучение, связанное с неустойчивостью нижней границы развивающегося ПС, приводит к торможению ветрового переноса массы внутри ПС — явлению, называемому «радиационным трением». Ослабление ветрового переноса влечёт за собой: (i) ослабление генерации турбулентной энергии в ПС и уменьшение толщины этого слоя; (ii) уменьшение вертикальной скорости на нижней границе ПС, которая индуцирует бароклинный отклик на движущийся ТЦ; (iii) подавление аномалий температуры поверхности океана в следе ТЦ. Модель океана, учитывающая радиационное трение, валидируется с использованием обширной базы данных спутниковых измерений температуры поверхности океана, вызванных различными ТЦ в разных районах Мирового океана.

Результаты сравнения демонстрируют эффективность модели в довольно широком диапазоне условий, что указывает на то, что радиационное трение является важным компонентом динамики океана, влияющим на интенсивность охлаждения поверхности океана при воздействии тропического циклона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 26-17-00333 https://rscf.ru/project/26-17-00333/), и Госзадания Министерства науки и образования FSZU-2025-0005 в РГГМУ, и FNNN-2024-0001 в МГИ РАН.

Механизм блокировки поверхности воды малыми примесями (эксперимент и моделирование)

Плаксина Ю.Ю., Высоцкая Ю.К., Родыгин В.И., Пуштаев А.В., Уваров А.В.
Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
yuplaksina@mail.ru

Ключевые слова: *блокировка поверхности воды, растворимая примесь, приповерхностная конвекция*

Явление блокировки поверхности пузырьков воздуха в воде хорошо известно с момента исследований скорости их всплытия. В последние годы было показано, что это явление также характерно и для плоской поверхности на границе «вода-воздух» и связано с наличием даже незначительного количества примесей на ней [1]. Эта блокировка меняет гидродинамику приповерхностного слоя, и её необходимо учитывать при построении моделей тепломассопереноса вблизи поверхности воды. В данной работе рассматривается механизм блокировки поверхности и условия её возникновения. Для исследования кинетики адсорбции-десорбции растворимой примеси и трехмерной конвекции в работе использовались как лабораторные эксперименты с остыванием водопроводной воды и деионизированной воды с контролируемыми примесями, так и численное 3D-моделирование.

Было показано, что даже очень малые концентрации примесей в воде порядка 0.01 моль на кубометр и даже меньше, могут менять граничные условия от условий «свободной поверхности» к условию медленного движения поверхности, обеспечивающему квазистационарное распределение примесей, которое в первом приближении может описываться условием прилипания. Граничные условия начинают зависеть от концентрации примеси, что делает многие результаты привязанными к конкретным измерениям, так как меняются свойства воды, в которых эти измерения проводятся. Это позволяет объяснить, например, сильный разброс при измерении параметров шероховатости поверхности при малых скоростях ветра (как минимум, до 3 м/с) [2].

Работа была выполнена с использованием оборудования, приобретённого за счёт средств Программы развития Московского университета. Исследование проводилось в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова и с использованием суперкомпьютера «МГУ-270».

Литература

1. Плаксина, Ю. Ю. Влияние пленки естественных примесей на распределение температуры в приповерхностном слое воды / Ю. Ю. Плаксина, В. И. Родыгин, А. В. Пуштаев [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2026. — Т. 62, № 1. — С. 60–68.
2. Репина, И. А. Параметр шероховатости мелководных водоемов / И. А. Репина, А. Ю. Артамонов, И. А. Капустин [и др.] // Водные ресурсы. — 2023. — Т. 50, № 5. — С. 602–612

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Развитие модели TerM для масштабируемой оценки потоков углерода на основе данных FLUXNET

Покровская А.И., Шангареева С.К., Степаненко В.М.
Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
aipokrovskaya@mail.ru

Ключевые слова: *моделирование углеродного цикла, TerM, оптимизация параметров, фотосинтез, машинное обучение, потоки CO_2*

Современные модели деятельного слоя суши часто используют усреднённые параметры растительности, что снижает точность оценки углеродного баланса и надёжность климатических прогнозов. Предложен комплексный подход к совершенствованию модели TerM (ИВМ РАН–МГУ): калибровка параметров, внедрение физиологически обоснованной P-модели фотосинтеза и коррекция ошибок с помощью машинного обучения алгоритмом CatBoost. Валидация проведена для станции «Федоровское» (Тверская обл.; заболоченный ельник сфагново-черничный).

На первом этапе методом FAST отобраны наиболее значимые параметры тепло-, влагопереноса и углеродного цикла, затем выполнена их оптимизация методом ROPE, основанном на поиске устойчивых множеств параметров. По итогам оптимизации среднеквадратичная ошибка для потоков скрытого тепла снизилась на 30%, для потоков дыхания — на 27%.

На втором этапе в TerM внедрена P-модель, рассчитывающая валовую первичную продукцию (GPP) по метеоданным без привязки к типу растительности. Подход основан на координации ферментов и минимизации затрат на транспирацию. P-модель сокращает число параметров и учитывает быстрые реакции растений и медленную (~15 суток) акклиматизацию. Интеграция P-модели снизила среднюю ошибку с 35% до 11% относительно исходного блока фотосинтеза TerM.

На третьем этапе CatBoost применён для коррекции остаточных ошибок нетто-экосистемного потока CO_2 (NEE). Постобработка снизила RMSE на 58% — с 1,27 до 0,53 мкмоль $CO_2/(м^2 \cdot с)$, приблизив точность модели к инструментальной погрешности измерений.

Результаты подтверждают эффективность комплексного подхода: физического моделирования, оптимизации параметров и машинного обучения. Сейчас проводится оптимизация TerM на глобальной сети FLUXNET для оценки переносимости калибровки между экосистемами и повышения надёжности глобальных оценок углеродного баланса.

Литература

1. Володин, Лыкосов, 1998a, Изв. РАН. Физ. атм. и океана, 34(4), 453–465.
2. Bárdossy, Singh, 2008, Hydrol. Earth Syst. Sci., 12(6), 1273–1283.
3. Stocker et al., 2020, Geosci. Model Dev., 13(3), 1545–1581. DOI: 10.5194/gmd-13-1545-2020.

Турбулентные потоки заряда и ковариационная поправка к скорости рекомбинации лёгких ионов в приземном слое атмосферы

Прохорчук А.А., Галиченко С.В., Дмитриев Э.М., Анисимов С.В.
Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Борок, Россия
aleksandr.prokhorchuk@mail.ru

Ключевые слова: *приземный электродный эффект, вихреразрешающее моделирование, турбулентная диффузия*

Электродный эффект в приземном слое атмосферы (ПСА) проявляется в зависимости электрических характеристик среды от расстояния до земной поверхности [1]. В классическом подходе задача электродного эффекта рассматривается в одномерном приближении, а её решение определяет средние вертикальные профили концентраций ионов и электрических переменных, упуская при этом вклад ковариаций турбулентных флуктуаций в нелинейных компонентах баланса. На основе вихреразрешающего моделирования турбулентной электродинамики ПСА определяется величина вклада ковариации концентрации лёгких ионов в скорость их рекомбинации и оцениваются отклонения решений, полученных в одномерной и трёхмерной моделях электродного эффекта в квазистационарном приближении.

Расчёты выполнены в модифицированной модели динамики атмосферного пограничного слоя атмосферы PALM версии 24.04 [2] на вложенных сетках с кубическими ячейками (шаги 20 м, 5 м и 1,25 м). Рассмотрены различные режимы стратификации атмосферы: нейтральная, со скоростью геострофического ветра 2 и 10 м/с, и неустойчивая, с кинематическим потоком тепла вблизи поверхности 0,05 и 0,15 К·м/с. В одномерной модели использован диагностированный в PALM профиль коэффициента турбулентной диффузии пассивного скаляра.

Усреднённый рекомбинационный сток $R = \alpha \langle n_+ n_- \rangle$ можно представить в виде суммы $R_M = \alpha \langle n_+ \rangle \langle n_- \rangle$ и $R_F = \alpha \langle n'_+ n'_- \rangle$ $R_F = \alpha \langle n'_+ n'_- \rangle$. Максимум R_F / R_M достигает 2–12 % в зависимости от режима в приземном слое атмосферы не выше 2 м от подстилающей поверхности. Приводятся метрики отклонений решений трехмерной и одномерной электродинамической моделей ПСА.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2025-0049.

Литература

1. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог. Издательство ТРТУ, 1998. 123 с.
2. Maronga B. et al. Overview of the PALM model system 6.0 // Geosci. Model Dev. 2020. V. 13. P. 1335–1372.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Экспериментальные исследования мезомасштабных структур над неоднородной поверхностью

Репина И.А.[1,2], Барсков К.В.[1], Новикова Е.В.[1], Пашкин А.Д.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
repina@ifaran.ru

Ключевые слова: *атмосферная турбулентность, приземный слой атмосферы, когерентные структуры, мезомасштабная турбулентность, вертикальный обмен, термическая стратификация, неоднородная подстилающая поверхность, экспедиционные наблюдения, городская застройка, численные модели*

Доклад посвящен экспериментальному изучению характеристик атмосферной турбулентности и идентификации когерентных структур в приземном слое атмосферы по данным многолетних наблюдений на измерительных площадках Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и в экспедиционных условиях.

Исследования охватывают контрастные типы подстилающей поверхности и атмосферной стратификации: полярные и прибрежные районы, городские территории, равнинные и предгорные ландшафты. Такой набор условий позволяет сопоставлять универсальные закономерности турбулентного обмена со спецификой, обусловленной неоднородностью рельефа, термической стратификацией, взаимодействием атмосферы с водной поверхностью и влиянием городской застройки.

Ключевое внимание в докладе уделяется методам идентификации когерентных структур — упорядоченных вихревых образований, которые вносят значимый вклад в перенос энергии и примесей, но не описываются полностью в рамках классических представлений об однородной турбулентности. На основе многолетних данных рассматриваются подходы к выделению таких структур и оценке их роли в вертикальном обмене в неоднородных условиях.

Совокупность полученных результатов развивает представления о механизмах вертикального обмена в приземном слое атмосферы и создает основу для верификации численных моделей атмосферной динамики и распространения примесей в неоднородных условиях. В докладе будут обобщены методические подходы, экспериментальные результаты и перспективы дальнейших исследований мезомасштабной турбулентности и когерентных структур.

Работа выполнена при поддержке РНФ 24-17-00155.

Применимость аналитических моделей футпринта в неоднородных ландшафтах: на примере Звенигородской научной станции

Согачев А.Ф.[1,2], Балдандоржина А.Б.[1], Репина И.А.[2], Люлюкин В.С.[2]
[1]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
andreysogachev@gmail.com

Ключевые слова: *футпринт, турбулентность, измерения, неоднородный ландшафт, пограничный слой атмосферы, модель SCADIS, Звенигородская научная станция*

Работа посвящена оценке пространственных масштабов измерений — футпринта — комплекса Звенигородской научной станции ИФА им. А. М. Обухова РАН, включающего контактную (метеостанция на высоте 56 м, получасовой интервал) и дистанционную (профилемер с вертикальным разрешением 50 м, пятиминутный интервал) компоненты. Оценка необходима для сопоставления разнометодных измерений разного пространственного масштаба: величина футпринта определяется для каждой станции и уровня измерений. Данные высокого временного разрешения требуют столь же частой оценки, которую способны обеспечить аналитические методы с минимальным набором входных параметров.

В расчётах первого приближения аэродинамические параметры поверхности задавались лишь для точки размещения комплекса; результаты указали на зависимость футпринта от направления ветра и сезонность, а также на необходимость перехода к реалистичным параметрам поверхности по секторам направлений ветра. Сравнительный анализ двух подходов — классического аналитического метода и двумерного моделирования с использованием модели пограничного слоя SCADIS, учитывающей реальное распределение типов поверхности, — для двух сезонов позволил проверить применимость аналитических моделей к данным метеостанции и возможность их адаптации для интерпретации данных дистанционного зондирования.

Результаты с привлечением реальных данных о прилегающем ландшафте уточнили оценки футпринта для комплекса и продемонстрировали ограниченность упрощённых аналитических оценок в неоднородных ландшафтах (при сочетании на наветренной дистанции лесных и луговых участков), а также для высот выше приземного слоя, охватываемых профилемером. Тем не менее аналитические оценки остаются предпочтительными для соотнесения данных комплекса благодаря вычислительной эффективности. Перед использованием рекомендуется их коррекция, опирающаяся на результаты моделирования высокого разрешения и лагранжева моделирования обратного хода с учётом устойчивости атмосферы.

Сравнительный анализ характеристик городского острова тепла в северных и южных столицах России, Казахстана и Китая

Тихоненко Н.Д.[1,2], Гинзбург А.С.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*НПЦ «Мэп Мейкер», Москва, Россия*
n.tikhonenko@ifaran.ru

Ключевые слова: *городской остров тепла, антропогенный поток, моделирование*

Исторически сложилось, что в ряде крупнейших по площади государствах Евразии – Россия, Казахстан и Китай – существуют северные и южные столицы – Москва и Санкт-Петербург, Астана и Алматы, Пекин и Нанкин. Они расположены в зонах резко континентального, континентального, умеренно континентального, умеренно субтропического климата и их физико-географические и городские характеристики существенно различаются. Соответственно различаются и антропогенные потоки тепла, создаваемые этими агломерациями, а также интенсивности их городских островов тепла.
Для моделирования мезомасштабных (мезо-γ) метеорологических, а также локальных климатических процессов в городах необходимо использовать такие параметры как: альбедо урбанизированной поверхности, шероховатость, плотность застройки, ширину и длину улиц, высоту и тепловые свойства зданий, антропогенные потоки тепла. В ранее опубликованных исследованиях, посвященных этим городам, использовались стандартные городские параметризации в мезомасштабных численных моделях. Авторы предприняли попытку представить конкретные параметры для моделирования северных и южных столиц России, Казахстана и Китая. Также приводятся результаты сравнительного анализа их физико-географических характеристик и городских островов.
Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 125021001827-3.

Вклад морских брызг в газообмен между океаном и атмосферой

Троицкая Ю.И., Зотова А.Н., Ермакова О.С., Сергеев Д.А.
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
yuliya@ipfran.ru

Ключевые слова: *газообмен, углекислый газ, капли, пограничный слой, штормовые ветра*

Морские брызги – типичный элемент приводного слоя атмосферы при высоких скоростях ветра. Есть указания на то, что они вносят заметный вклад в обмен энергией, импульсом и веществом между атмосферой и океаном, возрастающий с ростом скорости ветра. Большие технические проблемы делают практически невозможным измерение характеристик брызг в натурных условиях во время ураганов. В связи с этим данные, полученные при стандартных скоростях ветра, экстраполируются на ураганные условия. Однако лабораторные эксперименты показывают, что при скорости ветра, превышающей 25-30 м/с, активируются и доминируют новые механизмы образования брызг, в частности, дробление по сценарию «парашют». Предложен метод переноса данных лабораторных измерений на натурные условия, построена функция генерации брызг (ФГБ), которая определяет объемный поток капель, быстро растущий с ростом скорости ветра и развитием ветрового волнения

На основе построенной ФГБ получены оценки вклада морских брызг в газообмен между атмосферой и океаном при высоких скоростях ветра. В рамках предположения о равновесии газообмена капли, которая обменивается теплом и влагой с атмосферой, сделаны оценки потока углекислого газа (CO2) без учета химических реакций при растворении в воде, поскольку характерное время реакции гидратации CO_2 существенно больше типичного времени нахождения в атмосфере крупных капель, которые вносят основной вклад в поток CO_2. Показано, что при скорости ветра 20-25 м/с поток CO_2, ассоциированный с каплями, превосходит прямой поток от поверхности воды. Выполнены оценки вклада капель в среднюю скорость газообмена CO_2 в областях Мирового океана с высокими средними скоростями ветра. Показано, что в зимний период учет вклада брызг увеличивает среднюю скорость газообмена до 40%. Это указывает на то, что морские брызги могут быть важнейшим климатическим фактором.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 24-17-00299).

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Оценка обусловленного отоплением антропогенного потока тепла в городах Российской Федерации с населением не менее трехсот тысяч человек

Фролькис В.А.[1,2,3], Евсиков И.А.[1,3]
[1]*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия*
VFrolkis@gmail.com

Ключевые слова: *отопительный период, антропогенный поток тепла, административная и урбанизированная территории*

В России 68 городов с населением не менее 300 тысяч человек. Антропогенный поток тепла (АПТ), возникающий в плотно застроенных городских районах в течение отопительного периода, может приводить к повышению температуры на 5–10 ºС, а также вносить вклад в конвекцию и влиять на погоду. В городах, расположенных на севере, АПТ зимой сравним с инсоляцией.

Сервисы OSM, Яндекс.Карты и ГИС ЖКХ позволили с разрешением 30×30 м^2 построить модели застройки городов, найти площади ограждающих конструкций и объемы городских зданий, а их теплофизические свойства задать на основе Свода правил. АПТ от каждого здания находится по разности между температурами внутреннего и наружного воздуха, городской АПТ получается в результате суммирования по всем зданиям.

АПТ находится для административной и урбанизированной городской территории, так как доля площади зданий занимает менее 9% в пределах административных границ, а на урбанизированной территории порядка 30%.

Согласно Своду правил, реализованы три алгоритма оценки АПТ. В первом используется нормируемое значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Во втором — понятие удельной теплозащитной характеристики здания. В третьем — расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. АПТ оценивается за отопительный период как по средней температуре наружного воздуха, так и по фактическим среднесуточным температурам.

Усредненная плотность АПТ (Вт/м^2) с урбанизированной территории по трем алгоритмам составляет для: Москвы 20,49, 34,26 и 47,48; Санкт-Петербурга 18,23, 29,96 и 41,25. Аналогично, плотность АПТ (Вт/м^2) для городов с населением:

0,84–1,0 млн. чел. находится в интервале 16,23–20,63, 27,12–33,62, 34,85–51,40;
600–700 тыс. чел. — 15,21–18,17, 24,41–28,82 и 23,44–44,16;
500–600 тыс. чел.— 13,74–20,22, 20,63–32,77 и 19,83–44,69;
400–500 тыс. чел.— 14,52–17,66, 23,20–27,97 и 18,78–41,33;
300–400 тыс. чел.— 13,69–18,05, 21,66–28,23 и 24,18–55,85.

Связь турбулентного потока импульса и потока тепла в атмосферном пограничном слое при устойчивой стратификации

Юшков В.П.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
vpyushkov@gmail.com

Ключевые слова: *турбулентный поток тепла и импульса, устойчиво стратифицированный АПС*

В докладе рассматривается связь флуктуаций температуры и скорости звука в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое с кинетической энергией вихревых флуктуаций и скоростью их диссипации ϵ_v. Расчёты ковариаций флуктуаций скорости звука и вертикальной компоненты скорости ветра показывают, что в устойчиво стратифицированном пограничном слое наблюдается предельный переход к состоянию, в котором турбулентный поток тепла и поток импульса пропорциональны друг другу и связаны без каких-либо эмпирических коэффициентов, а скорость выравнивания флуктуаций скорости звука ϵ_c превышает ϵ_v. Предложен критерий ($\epsilon_c > \epsilon_v$), характеризующий это состояние сильной устойчивости. Предполагается, что этому состоянию соответствует вырожденная (неколмогоровская) функция распределения флуктуаций скорости звука. Через соотношение ϵ_c и ϵ_v определяется критическое число Рейнольдса, а потоковое число Ричардсона представляется произведением двух безразмерных чисел, изменяющихся с высотой.

Адиабатические флуктуации в конвективном пограничном слое

Юшков В.П.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
vpyushkov@gmail.com

Ключевые слова: *конвективный пограничный слой, высота, адиабатические флуктуации*

В докладе, на примере свойств конвективного атмосферного пограничного слоя, рассматривается роль адиабатических флуктуаций в теории турбулентности. Формирование этих флуктуаций связывается с пространственными неоднородностями энтропии, выравнивание которых приводит при взаимодействии воздушных частиц к генерации широкого спектра адиабатических волн – адиабатического шума. Малые адиабатические флуктуации с большим пространственным и малым временным масштабом корреляции рассматриваются как причина стохастизации уравнений гидродинамики. Работа сил плавучести сопоставляется со скоростью генерации вихревых флуктуаций, а параметр (скорость) Дирдорфа со средней интенсивностью турбулентного перемешивания в АПС и отношением масштабов локальной однородности несжимаемых вихрей и адиабатических волн. В рамках предложенной гипотезы об однородности и изотропности адиабатического шума в толщине АПС показано, что потоки тепла и импульса в конвективном пограничном слое взаимосвязаны, а генерация турбулентных вихрей определяется корреляцией адиабатических флуктуаций давления и сжимаемости лагранжевых частиц. Статистические расчёты по мачтовым флуктуационным измерениям в конвективном АПС подтверждают предлагаемые соотношения.

Нейронно-сетевые методы в обработке радиозатменных данных

Горбунов М.Е.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
gorbunov@ifaran.ru

Ключевые слова: *радиозатменное зондирование, нейронные сети, восстановление метеопараметров, демодуляция*

Радиозатменное зондирование атмосферы Земли основано на ее лимбовом радиопросвечивании сигналами глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС). По измерениям фазы и амплитуды восстанавливаются высотные профили атмосферного показателя преломления. Использование уравнения гидростатики совместно с восстановленным профилем показателя преломления позволяет восстанавливать давление и температуру для сухой атмосферы. Однако дисперсия нейтральной компоненты показателя преломления в частотных диапазонах ГНСС мала. Поэтому задача восстановления температуры, давления и влажности не имеет однозначного решения. Обычно для этой цели применяются методы вариационного усвоения. Мы рассматриваем новый нейронно-сетевой метод восстановления метеопараметров. Для этой цели найден оптимизированный по сравнению с [1, 2] набор входных переменных. Мы выполняли тренировку нейронной сети на результатах обработки данных COSMIC методами вариационного усвоения (продукты данных atmPrf, wetPrf). Построенная нейронная сеть позволяет определять профили метеопараметров без дополнительной априорной информации. Точность определения удельной влажности не хуже 1 г/кг, а температуры не хуже 2-3 К. Наилучшая точность достигается в тропиках и полярных районах.

Как продемонстрировал проект COSMIC, для точного определения параметров тропосферы необходимы измерения в режиме открытой петли. Использование этого режима требует демодуляции измеренной фазы. Фаза промодулирована псевдослучайной телеграфной функцией со значениями 0 и π, соответствующим навигационным битам, следующим с частотой 50 Гц. Для демодуляции используются либо отдельные измерения навигационных битов, либо измерения с высокой частотой выборки (до 1000 Гц). Мы предлагаем нейронно-сетевой алгоритм демодуляции, позволяющий правильно определять до 97% навигационных битов.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (FMWR-2025-0002, рег. карта 125020601652-8).

Литература

1. Shyam A., Gohil B.S., Basu S. Retrieval of water vapour profiles from radio occultation refractivity using artificial neural network // Indian J. Radio Space Phys. 2016. V. 42. P. 411–419.
2. Lasota, E. Comparison of different machine learning approaches for tropospheric profiling based on COSMIC-2 data. Earth Planets Space 2021. V. 73. Art. 221.

Использование данных радиозатменного зондирования для оценки сплоченности арктического ледяного покрова

Горбунов М.Е.[1,2], Шмаков А.В.[1], Киселева Ю.В.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
av_shmakov@ifaran.ru

Ключевые слова: *радиозатменный метод, морской лед, Арктика*

Метод радиозатменного зондирования, основанный на просвечивании атмосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем, является эффективным инструментом для мониторинга состояния ионосферы, нейтральной атмосферы и поверхности Земли. Отраженные от земной поверхности сигналы в спутниковых радиозатменных данных были обнаружены в начале 2000-х годов при помощи радиоголографического анализа. Это позволило извлечь как дополнительную информацию о нижней тропосфере, так и свойства подстилающей поверхности. Для восстановления отраженного сигнала применяется метод канонических преобразований, использующий интегральные операторы Фурье. Анализ данных радиозатменного эксперимента COSMIC-1/FORMOSAT-3 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate / Formosa Satellite Mission) показал, что наиболее интенсивное отражение фиксируется над морской поверхностью и ледовыми массивами. Для оценки интенсивности отраженного сигнала был введен специальный индекс отражения, вычисляемый на базе радиоголографического спектра. Распределения индекса отражения сопоставляются с данными реанализа ледового покрова ERA5 (ECMWF Copernicus). Сравнение проводилось для полярных широт и различных сезонов 2008 года.
Работа выполнена при поддержке госзадания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (FMWR-2025-0002, рег. номер 1022041300352-9-1.5.2)

Оценка формы и характеристик повторных акустических приходов в атмосфере с помощью слепой деконволюции

Закиров М.Н.[1], Чуличков А.И.[1,2], Куличков С.Н.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
zakirov.mn16@physics.msu.ru

Ключевые слова: *атмосферная акустика, стратификация акустика, многолучевость, слепая деконволюция, информационный критерий*

В работе разработан алгоритм слепой деконволюции, позволяющий по зашумлённой записи совместно оценить форму и эффективную длительность повторяющейся компоненты, число её приходов, амплитуды и временные задержки. Алгоритм учитывает перекрытие компонент и выбирает параметры модели по информационному критерию.

В слоистой атмосфере градиенты температуры изменяют скорость звука и показатель преломления: при рефракции и волноводном распространении возмущение может приходить к приёмнику по нескольким траекториям [1]. Запись давления на микробарографе при этом представляет собой сумму задержанных и масштабированных копий сигнала с неизвестной формой [2]. Рассматривается модель $y(t) = \sum_{k=1}^{K} a_k f(t - t_k) + \varepsilon(t)$, где f - общая форма компоненты, L - её эффективная длительность, K - число приходов, t_k и a_k - задержки и амплитуды, ε - шум.

Параметры оцениваются попеременно: амплитуды - методом наименьших квадратов, форма - регуляризованной линейной задачей со сглаживанием по второй разности; задержки ищутся на целочисленной сетке путём уменьшения невязки. После добавления новых компонент форма и амплитуды уточняются совместно, что позволяет учитывать перекрытие компонент. K и L выбираются по критерию типа MDL/EBIC, ограничивающему сложность модели. Для устойчивости применяются инициализация по сингулярному разложению и по нескольким наиболее крупным фрагментам, а также несколько запусков.

Работоспособность модели проверена на синтетических данных, после чего она была апробирована на реальном сигнале.

Метод позволяет анализировать сигналы без известного шаблона, однако в шумных данных восстанавливается эффективная, а не обязательно точная граница формы: слабые хвосты могут быть неотличимы от шума.

Работа поддержана грантом РНФ № 25-17-00060.

Литература

1. Idrisov, A.F., Chulichkov, A.I., Zakirov, M.N. et al. Time Delay Estimation of Long-Duration Infrasound Pulses Using Morphological Waveform Analysis. Pure Appl. Geophys. (2026).
2. Закиров М.Н., Куличков С.Н., Чуличков А.И. [и др.]. Метод декомпозиции в задаче акустического зондирования анизотропной структуры атмосферы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 511, №1. – С. 98–104.

Исследования мезомасштабных волн в ионосфере по данным миссий Swarm и CSES

Захаров В.И.[1,2,3], Чэнь Чуаньфу[4]
[1]*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*
[4]*Даляньский морской университет, Далянь (DLMU), Китай*
zvi_555@list.ru

Ключевые слова: *ионосфера, электронная концентрация, плазма, волновое возмущение, циклон*

В работе проведено исследование мезомасштабных волн в ионосферной плазме как результата воздействия атмосферных возмущений на примере тропических тайфунов Ampil и Jebi тихоокеанского региона сезона 2024 г. с привлечением данных спутниковых миссий Swarm и CSES.

Миссия Европейского космического агентства (ESA) Swarm состоит из трёх спутников, запущенных в ноябре 2013 года на почти полярные околоземные орбиты с высотами примерно 430–530 км. Два спутника движутся в близком орбитальном положении на более низкой высоте с небольшим продольным разнесением и временным разнесениями. Третий спутник функционирует на более высокой орбите. Такая конфигурация позволяет проводить высокоточные измерения электронной концентрации и геомагнитного поля и выделять ионосферные токи и их градиенты.

Китайский спутник электромагнитного мониторинга CSES (или Zhangheng-1) представляет собой низкоорбитальную космическую миссию, предназначенную для исследования электромагнитных и плазменных возмущений в околоземном пространстве. Спутник был запущен 2 февраля 2018 года и находится на солнечно-синхронной орбите с высотой около 507 км и наклонением приблизительно 97.4°. Такая орбитальная конфигурация обеспечивает сходный с миссией Swarm набор исследуемых параметров.

Совместное использование данных миссий CSES и Swarm предоставляет уникальные возможности для исследования плазменных возмущений и электромагнитных волн в ионосфере на трех высотных уровнях.

В работе рассмотрены методические вопросы использования апробированных способов детектирования волновых мезомасштабных возмущений плазмы [1] и представлены результаты их применения с учетом особенностей данных, получаемых каждой спутниковой системой.

Литература

1. Zakharov V.I., Sigachev P.K. Ionospheric disturbances from tropical cyclones // Advances in Space Research, Pergamon Press Ltd. (United Kingdom) 2022. V. 69. N 1. P.132-141. doi:10.1016/j.asr.2021.09.025

Оценка адекватности морфологических методов анализа формы временных рядов в задачах дистанционного зондирования Земли и атмосферы

Идрисов А.Ф.[1], Чуличков А.И.[1,2], Куличков С.Н.[1,2]
[1]*Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
idrisov.af17@physics.msu.ru

Ключевые слова: *морфологический анализ, форма сигнала, критерий согласия, тренд, инфразвук, N-волна, U-волна, вейвлет-спектр, временная задержка, точность оценивания*

Работа посвящена исследованию математических методов анализа формы временных рядов на основе теории морфологического анализа и их применению в задачах дистанционного зондирования Земли и атмосферы. Актуальность обусловлена необходимостью обработки больших объёмов геофизических данных при априорной неопределённости формы сигналов, высоком уровне шумов и нестационарности процессов. Классические спектральные и корреляционные методы чувствительны к вариациям условий регистрации, что приводит к неустойчивости оценок.

Рассматриваются два класса задач. Первый — выделение трендовой составляющей квазипериодического временного ряда. В качестве формы выбрано множество неубывающих последовательностей; проекция на эту форму даёт монотонный тренд. Предложен алгоритм построения такой последовательности на основе последовательного усреднения убывающих участков. Одним из основных результатов является проверка адекватности модели. Разработан критерий согласия экспериментальных данных с предположением о форме сигнала на основе неравенства Чебышева. Получена оценка вероятности того, что наблюдаемое расстояние от сигнала до формы обусловлено случайными флуктуациями. Значение оценки свидетельствует об адекватности использованной модели.

Второй класс задач — оценка относительной временной задержки инфразвуковых сигналов от импульсных источников. Предложены две модели формы сигнала: на основе упорядоченности отсчётов и на основе вейвлет-спектра. Сформулирован критерий морфологической близости фрагментов и разработан алгоритм построения карт близости для определения сдвига. Другим основным результатом является исследование точности оценивания сдвига. Верификация на модельных данных в виде комбинации N- и U-волн показала, что абсолютная погрешность не превысила 0.04 с (1 отсчёт) практически во всём диапазоне параметров. Апробация на реальных данных подтвердила работоспособность методов и их преимущество перед корреляционным анализом.

Литература

1. Идрисов А.Ф. Математические методы анализа формы временных рядов и их приложения к дистанционным исследованиям Земли и атмосферы // Ученые записки физического факультета Московского Университета. 2024. № 3. С. 2430702.
2. Идрисов А.Ф., Чуличков А.И., Куличков С.Н. Морфологические методы оценивания относительной задержки инфразвуковых сигналов в виде N- и U-волн // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2026. Т. 81, № 2. С. 2620902.

Применение сети микробарографов для анализа когерентных возмущений в устойчиво стратифицированном АПС

Креузов А.С.[1,2], Куличков С.Н.[1,2], Попов О.Е.[1], Зайцева Д.В.[1], Люлюкин В.С.[1,2], Кузнецов Д.Д.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
kreuzov.as21@physics.msu.ru

Ключевые слова: *внутренние гравитационные волны, предвестники атмосферных фронтов, микробарограф*

Прохождение атмосферных фронтов сопровождается генерацией внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые могут распространяться впереди фронтальной зоны и регистрироваться наземными микробарографами до прихода самого фронта [1]. Регистрация таких волн сетью разнесённых датчиков позволяет определить скорость и направление их распространения и рассматривать их как возможные предвестники фронтов и сопровождающих их опасных явлений погоды.

В работе проанализированы записи флуктуаций атмосферного давления, полученные в 2020 году на сети из трёх микробарографов, расположенных в Москве: в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА), на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова (МГУ) и в районе поселка Мосрентген (МР). Станции образуют треугольник со сторонами примерно 7,3, 9,9 и 16 км. Станция МР работала с перерывами, поэтому с мая по октябрь анализ проводился по паре ИФА–МГУ. Фронты выделялись автоматически по резким изменениям барической тенденции, а пакеты ВГВ по огибающей сигнала в полосе 10–180 мин. Скорость и направление распространения находились по задержкам взаимной корреляции методом триангуляции в приближении плоской волны [2]. Результаты сопоставлялись с каталогом неблагоприятных явлений погоды в Москве и обзорами Росгидромета.

Алгоритм выделил 80 событий, общих для двух-трёх станций (39 фронтов и 41 пакет ВГВ). На рисунке 1 приведён пример 4 января 2020 года. Примерно за 3 ч до скачка давления в 03:50 когерентность на периодах 10–60 мин возрастает до 0,8–0,9.

Полученные примеры соответствуют представлениям о ВГВ, генерируемых фронтальной системой и распространяющихся впереди нее. Сеть микробарографов позволяет регистрировать такие волны за несколько часов до прихода фронта и оценивать параметры их распространения, а совместный анализ мощности и межстанционной когерентности отличать атмосферные волны от ветрового шума у датчиков.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-17-00060.

Литература

1. Gossard E.E., Hooke W.H. Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves — Their Generation and Propagation. Amsterdam: Elsevier, 1975. 456 p.
2. Куличков С.Н., Чунчузов И.П., Попов О.Е., и др. Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 мая 2017 г Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, издательство ФГБУ "Издательство "Наука" (Москва). 2019. Т. 55. № 2. С. 32-40

Негладкие решения уравнений гравитационной гидродинамики и тонко-слоистые структуры

Кшевецкий С.П.[1,2,3], Курдяева Ю.А.[4], Гаврилов Н.М.[3], Куличков С.Н.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[4]*Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград, Россия*
SPKshev@gmail.com

Ключевые слова: *гидродинамика, нелинейность, недифференцируемость, тонкие структуры, энтропия*

Рассматриваются уравнения нелинейной динамики газа в поле тяжести. Известно, что гладкие решения существуют лишь конечное время. На больших временах применяют понятие обобщённых (слабых) решений и строят интегральные уравнения вместо дифференциальных. Интегральные уравнения основаны на фундаментальных законах сохранения; в этой части подход понятен и общепринят. Однако в теории существует проблема неединственности решений. Чтобы преодолеть проблему неединственности, интегральные уравнения дополняют так называемым энтропийным условием, которое в литературе имеет различные несовпадающие варианты. Это известная фундаментальная проблема гидродинамики, особенно в интересующих нас двумерном и трёхмерном случаях. Предлагается доопределять решение, используя положения неравновесной термодинамики, а именно принципы неотрицательности и минимума производства энтропии в каждой точке. Доказывается ограниченность таких решений. Строится численный метод, удовлетворяющий сформулированным требованиям, и производится сравнение численных и аналитических негладких недифференцируемых решений. В частности, рассматриваются фракталы. Теория применима, в частности, к тонкослоистым структурам, постоянно присутствующим в атмосфере, поскольку показано, что они, судя по экспериментальной информации, описываются недифференцируемыми функциями. Приведены примеры численного моделирования тонкослоистых структур в атмосфере.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Метод местоопределения гроз по данным однопунктового ОНЧ-пеленгатора

Малкина О.Е., Малкин Е.И., Чернева Н.В.
Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия
malkina@ikir.ru

Ключевые слова: *импульсное электромагнитное излучение, молния, вулканические грозы, свистящие атмосферики, высотные молниевые разряды, ОНЧ-пеленгатор, нейросетевой анализ, pulsed electromagnetic radiation, lightning, volcanic thunderstorms, whistlers, high-altitude lightning discharges, VLF direction finder, neural network analysis*

Рассмотрена задача локализации источников импульсного электромагнитного излучения (ИЭИ) ОНЧ-диапазона, включающих атмосферные, магнитосферные и литосферные/вулканические процессы. Для локализации ИЭИ применяются два подхода: однопунктовая пеленгация и многопунктовые разностно-дальномерные системы. Наиболее известные сетевые системы — NLDN и WWLLN — обеспечивают высокую точность и глобальный охват, но ограниченно регистрируют слаботочные разряды. Ограничения WWLLN особенно существенны для вулканических гроз и трассировки эруптивных облаков, поэтому однопунктовый ОНЧ-пеленгатор рассматривается как альтернатива или дополнение к многопунктовым сетям, не требующий плотной сети станций. ОНЧ-пеленгатор ИКИР ДВО РАН включает две взаимно перпендикулярные рамочные магнитные антенны, вертикальную штыревую электрическую антенну, предварительные усилители, согласованные кабельные линии, АЦП, микрокомпьютер и программный комплекс обработки данных. Обработка сигналов основана на дискретном преобразовании Фурье: определяются амплитуды и фазы компонент поля, строится фазовый портрет эллипса поляризации, после чего с учётом фазы Ez-компоненты вычисляется азимут прихода излучения. Для оценки дальности предложена модель многомодовой интерференции ТМ-волн, возбуждаемых в волноводе Земля–ионосфера. В ней учитывается частотно-зависимое затухание: низкие частоты ослабляются быстрее, а спектр принятого сигнала по мере удаления смещается в сторону высоких частот и обогащается гармониками. Полученные методические результаты важны для развития однопунктовой грозолокации, мониторинга вулканических гроз, высотных молниевых разрядов и свистящих атмосфериков. Перспективы связаны с уточнением дальномерной модели, модовой фильтрацией, калибровкой антенной системы и применением нейросетевого анализа.

Литература

1. Малкин Е. И., Дружин Г. И. Аппаратно-программный комплекс и методика наблюдений ОНЧ–излучений на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2025. Т. 51, № 2. С. 122-141.
2. Malkin E., Druzhin G., Firstov P., Cherneva N., Uvarov V., Sannikov D., Stasiy I. Principles of Creation of Local Network for Lightning Discharge Observations on Active Volcanoes of Kamchatka Peninsula // E3S Web of Conf. 127, 02021(5) (2019) https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912702021

Эффекты внезапных стратосферных потеплений в верхней атмосфере над Восточной Сибирью

Медведева И.В.[1,2], Ратовский К.Г.[1]
[1]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
ivmed@iszf.irk.ru

Ключевые слова: *внезапное стратосферное потепление, верхняя атмосфера, взаимодействие атмосферных слоев*

Представлены результаты исследования эффектов зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП) различного типа в 2008 и 2013 гг. в верхней атмосфере над Восточной Сибирью. В январе-феврале 2008 г. произошло четыре события ВСП, последнее из которых может быть классифицировано как значительное (major) с изменением направления среднего зонального (60° с.ш., 10 гПа) ветра с западного на восточное 22 февраля. Во время значительного ВСП в январе 2013 г. реверс среднего зонального ветра наблюдался 6-28 января. В исследовании использованы данные о вращательной температуре молекулы гидроксила (полоса OH(6-2), 834.0 нм, ~87 км), полученные из спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8°N, 103.1°E, Торы), данные о наименьшей частоте отражений (fmin) на ионограмме вертикального зондирования на иркутском ионозонде (52.3°N, 104.3°E), спутниковые данные измерений вертикальных профилей температуры атмосферы Aura MLS и данные реанализа MERRA-2. Обнаружены значительные возмущения температуры атмосферы в большом диапазоне высот во время анализируемых событий. Для ВСП в январе-феврале 2008 г. выявлены волнообразные возмущения среднедневных значений fmin с амплитудой до 40%. Во время ВСП в январе 2013 г. в период реверса среднего зонального ветра наблюдались значительные (до 50%) возмущения среднедневных значений fmin. Обнаружена высокая степень корреляции температуры верхней атмосферы и минимальной частоты отражений во время ВСП. Для ВСП в январе 2013 г. проанализированы вариации возмущений Δfmin и остаточных отклонений ΔT вращательной температуры OH, которая отображает температуру атмосферы на высотах мезопаузы. Обнаружено усиление изменчивости Δfmin и ΔT в период наиболее значительных возмущений температуры и динамики средней атмосферы, что может быть вызвано повышением активности планетарных волн в верхней атмосфере во время ВСП. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00531, https://rscf.ru/project/25-27-00531.

Внутренние гравитационные волны и их активность в атмосфере Марса по данным эксперимента по солнечному просвечиванию ACS с борта аппарата ExoMars/TGO

Стариченко Е.Д.[1], Медведев А.С.[2], Беляев Д.А.[1], Фёдорова А.А.[1], Кораблев О.И.[1], Трохимовский А.Ю.[1]
[1]*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*
[2]*Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany*
ekaterina.starichenko@cosmos.ru

Ключевые слова: *гравитационные волны, Марс, солнечное просвечивание*

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) представляют собой распространение волновых колебаний в атмосфере, возникающих вследствие смещения равновесия между силой тяжести и силой Архимеда (плавучести). ВГВ переносят энергию и импульс, влияя на общую динамику атмосферы планеты. В данной работе рассматриваются параметры ВГВ [1] и их высотные распределения в атмосфере Марса. ВГВ выявляются из высотных профилей температуры, полученных из эксперимента по солнечному просвечиванию, выполняемым российским комплексом спектрометров Atmospheric Chemistry Suite (ACS) [2] на борту аппарата Trace Gas Orbiter (TGO). В эксперименте исследуются такие параметры, как амплитуда, потенциальная энергия и ускорение ВГВ [3]. Отдельно исследуется влияние глобальной пылевой бури на Марсе и конвективной неустойчивости, как механизма разрушения волн [4].

ACS находится на орбитальном аппарате TGO, который является частью европейско-российской миссии ExoMars 2016. Он состоит из трех спектрометров ближнего – NIR (0.73-1.6 мкм), среднего – MIR (2.3-4.2 мкм) и теплового – TIRVIM (1.7-17 мкм) инфракрасного диапазона. В данной работе используются данные каналов MIR и NIR. Оба прибора позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры и плотности по спектрам пропускания в полосах поглощения углекислого газа CO_2 в диапазоне высот – 10-180 км (MIR) [5], 10-100 км (NIR) [6]. Представленный объем данных охватывает наблюдения за три Марсианских года (MY) с середины MY34 (апрель 2018) по конец MY37 (ноябрь 2024). Объем данных насчитывает около 1100 сеансов солнечных затмений для канала MIR и около 12300 сеансов для NIR.

Исследование выполняется при поддержке гранта РНФ № 25-22-00494, https://rscf.ru/project/25-22-00494/

Литература

1. Starichenko E. D. et al. (2021) JGR: Planets, 683, 126, e2021JE006899
2. Korablev O. et al. (2018) Space Sci. Rev., 214:7
3. Starichenko E. D. et al. (2024) A&A, 683, A206
4. Starichenko E. D. et al. (2025) Front. Astron. Space Sci., 12:1672283.
5. Belyaev D. et al. (2022) JGR: Planets. 127, e2022JE007286
6. Fedorova A. et al. (2023) JGR: Planets. 128, e2022JE007348

Восстановление интенсивности меридиональных пульсаций по средним полям в модельной атмосфере с помощью нейронной сети

Степанов Р.А.
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
rodion@icmm.ru

Ключевые слова: *динамика атмосферы, бароклинная активность, меридиональные пульсации, вертикальные профили, нейронные сети, модельная атмосфера*

В работе исследуется возможность восстановления интенсивности меридиональных пульсаций по вертикальным профилям зонально средних полей атмосферы. Связь пульсаций со стратификацией и сдвигом скорости лежит в основе многих теоретических представлений о бароклинной неустойчивости, однако совместное влияние средних полей не описывается простой аналитической зависимостью. Ставится задача найти эту связь с использованием нейронных сетей и определить наиболее важные факторы.

Для обучения сети использованы результаты трёхлетнего моделирования атмосферы планеты с экваториальным океаном, зонально однородной подстилающей поверхностью и сезонными вариациями солнечного облучения [1,2]. Восстанавливается профиль среднеквадратичных отклонений меридиональной скорости от зонального среднего. На вход подаются профили средней зональной скорости U, потенциальной температуры Θ, меридиональной скорости V и геопотенциальной высоты Z. Рассмотрены все 15 непустых комбинаций полей.

Использован многослойный перцептрон с двумя скрытыми слоями и активацией ReLU. Проведено сравнение с линейной регрессией, постоянной и сезонной климатологией.

Было показано, что в полосе максимальной активности $35^\circ - 45^\circ$ комбинация U, Θ, Z снижает относительную ошибку всего профиля до 11,3% против 15,9% для сезонной климатологии и 14,7% для лучшей линейной модели. Среди отдельных полей наименьшую ошибку обеспечивает Z. Добавление V не улучшает лучший результат в этой полосе, но может быть полезно на других широтах. Общая модель сохраняет близкую точность в области максимума активности. Дополнительный признак широты наиболее существенен при использовании одного поля, а при сочетании нескольких профилей его влияние мало.

Результаты показывают возможность нейросетевого описания нелинейной статистической связи интенсивности пульсаций с вертикальной структурой среднего течения.

Литература

1. Sukhanovskii A., Stepanov R., Bykov A. et al. Mid-latitude baroclinic waves in a zonally homogeneous Earth-like planet // Climate Dynamics. 2025. Vol. 63. Article 74. DOI: 10.1007/s00382-024-07561-z.
2. Фрик П. Г., Степанов Р. А., Сухановский А. Н. и др. Общая циркуляция и бароклинные волны в атмосфере модельных зонально-однородных планет земного типа // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2025. Т. 61, № 6. С. 737-750. DOI: 10.7868/S3034648725060021

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Раннее внезапное стратосферное потепление ноября 2025 г.: тропосферные предвестники и динамическое взаимодействие слоёв атмосферы

Топтунова О.Н.[1,2], Коваль А.В.[1,2], Моцаков М.А.[2], Диденко К.А.[1,3]
[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия*
a.v.koval@spbu.ru

Ключевые слова: *взаимодействие тропосферы и стратосферы, внезапное стратосферное потепление, изоэнтропический анализ, планетарные волны, полярный вихрь*

Исследование посвящено изучению динамики главного внезапного стратосферного потепления (ВСП), которое развивалось в ноябре 2025 г. Это событие примечательно тем, что главные ВСП в ноябре случаются крайне редко. На основе данных реанализа MERRA-2 проанализированы тропосферные предвестники события. В частности, ему предшествовали аномально низкая площадь морского льда в Баренцевом и Карском морях (вблизи 5-го перцентиля), блокирующий антициклон над Гренландией и Арктикой, смещение тропосферного полярного вихря к полуострову Таймыр и усиленный меридиональный перенос тепла. Совместный анализ индексов блокирования Тибальди–Мольтени, меандрирования струйного течения и Северной кольцевой моды (СКМ) показал, что отрицательная фаза СКМ сформировалась в тропосфере в начале ноября и распространялась вверх. С середины ноября усиливалась планетарная волна 1, а восходящий поток волновой активности Пламба достигал максимума перед ВСП. Для диагностики события применён новый изоэнтропический индекс I850, рассчитанный на основе меридионального градиента давления на изоэнтропической поверхности 850 K. Индекс позволил определить более ранние даты начала (22 ноября) и пика (1 декабря) события по сравнению с классическими критериями. Выявлена необычная вертикальная структура события: несмотря на быстрое восстановление вихря на уровне 10 гПа, расщепление вихря в нижней стратосфере (50–100 гПа) сохранялось почти месяц. Показано, что такая структура поддерживала устойчивую отрицательную фазу Североатлантического колебания и Арктического колебания в декабре 2025 г. — январе 2026 г., а также усиленную адвекцию холода на северо-запад Северной Америки и в Северную Европу. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-47-00122).

Климатология вертикальной структуры внетропических циклонов Северного полушария по данным реанализа ERA5

Акперов М.Г.[1,2,3], Антипина У.И.[1,2], Семенов В.А.[1,4], Елисеев А.В.[1,2,5]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
[4]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[5]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
aseid@ifaran.ru

Ключевые слова: *внетропические циклоны, вертикальная структура, идентификация циклонов, реанализ*

На основе данных реанализа ERA5 за 1979–2024 гг. и разработанного метода вертикального трекинга на изобарических поверхностях исследована вертикальная структура внетропических циклонов Северного полушария (>30° с.ш.). Циклоны идентифицировались на семи изобарических поверхностях от 1000 до 300 гПа, а их вертикальная связность определялась по пространственному пересечению циклонических областей на соседних уровнях. Кроме того, получены оценки вертикальной протяжённости циклонов, прослеживаемых от 1000 гПа и выше. До уровня 500 гПа прослеживается 49,8% зимних и 40,6% летних приповерхностных циклонов, до 300 гПа — 37,6 и 34,9% соответственно. Исследована связь интенсивности циклона на уровне 1000 гПа с максимальной высотой его распространения.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Изменчивость уровня океана в Северной Атлантике и его связь с климатическими параметрами Баренцева моря

Ангудович Я.И.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
yiangudovich@aari.ru

Ключевые слова: *Северная Атлантика, спутниковые данные, морской уровень, циркуляция вод, Баренцево море, климатические индексы*

На основе комплексного анализа многолетних альтиметрических данных, реанализа и натурных наблюдений исследуется взаимосвязь межгодовой изменчивости уровня океана в Северной Атлантике с климатическими индексами и тепловым режимом Баренцева моря. Предложен новый индекс циркуляции ΔKW–P, рассчитываемый как градиент межгодовых значений уровня между станциями Key West (Флорида) и Portland (залив Мэн) на восточном побережье Северной Америки. Показано, что индекс является репрезентативным индикатором взаимодействия субтропического антициклонического и субполярного циклонического круговоротов. Отмечается высокая корреляция ΔKW–P с ранее полученным по альтиметрическим данным интегральным индексом североатлантической циркуляции (ИСЦ) (r = 0,74). Выявлены устойчивые статистически значимые связи с индексами Арктической осцилляции (r = 0,81 – 0,64), Североатлантического колебания (r = 0,87 – 0,77) и индексом северной стены Гольфстрима (r = 0,62 – 0,67). Установлено, что ΔKW-P представляет собой репрезентативный индикатор изменчивости теплового режима Баренцева моря. С помощью пошагового регрессионного анализа показано, что ΔKW–P значительно превосходит по вкладу в дисперсию климатических параметров Баренцева моря другие индексы Северной Атлантики (AO, CAK, AMO, TNA, EA/WR). Так, вклад ΔKW–P в температуру воздуха составляет 44 %, в температуру воды на Кольском меридиане — 37 %, в площадь ледового покрова — около 11 %. Показано, что многолетние наблюдения прибрежного уровня моря содержат ценную информацию о динамике климатической системы Северной Атлантики. Индекс ΔKW-P, основанный на данных с 1948 года, открывает новые возможности для исследования долгопериодных изменений климата и циркуляции вод не только в Северной Атлантике, но и в сопредельных регионах Арктического бассейна на масштабах, выходящих за пределы спутниковой эры.

Пространственно-временная изменчивость циклонов и антициклонов во внетропических широтах в 1979–2015 гг.

Антипина У.И.[1,2], Акперов М.Г.[1,2,3], Семенов В.А.[1,4], Елисеев А.В.[1,2,5]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
[4]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[5]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
ant.uly@yandex.ru

Ключевые слова: *внетропические циклоны, вертикальная структура, идентификация циклонов, реанализ*

Для анализа циклонов и антициклонов во внетропических широтах использованы данные о положении и характеристиках атмосферных вихрей на уровне среднего давления у поверхности моря (MSLP) и изобарических уровнях от 1000 до 300 гПа. Идентификация циклонов основана на алгоритме (Бардин и Полонский, 2005) и (Akperov M. et al., 2019). В работе исследованы основные характеристики атмосферных вихрей, включая продолжительность существования, площадь, длину траектории, среднюю скорость перемещения, интенсивность и глубину. Пространственные положения вихрей объединялись в непрерывные траектории с учётом их временной последовательности и принадлежности к соответствующим изобарическим уровням. Анализ циклонов и антициклонов проводился на основных изобарических поверхностях; в выборку включались вихри с продолжительностью существования более 1,5 суток. Для выявления пространственных закономерностей построены карты повторяемости атмосферных объектов и карты линейных трендов их характеристик. Совместный анализ этих полей позволяет оценить географическую неоднородность распределения вихрей, определить области их повышенной повторяемости и выявить пространственные особенности долговременных изменений. Для детального регионального анализа выделены три территории: Восточно-Европейский регион, Западная Сибирь, а также акватория Баренцева и Карского морей.

Погодные режимы Евро-Атлантики и Северной Евразии в моделях CMIP6: сопоставление с реанализом ERA5

Бабанов Б.А.[1], Семенов В.А.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
babanov@ifaran.ru

Ключевые слова: *погодные режимы, атмосферная циркуляция, кластеризация, климатические модели, Евро-Атлантика, NAO*

Режимный подход позволяет оценить, как климатические модели описывают не только средние поля атмосферного давления или геопотенциала, но и характерные типы крупномасштабной атмосферной циркуляции и их изменчивость. Для 23 моделей CMIP6 (эксперименты historical) и реанализа ERA5 за общий период 1950–2014 гг. выделены по четыре погодных режима для зимы и лета в Евро-Атлантике и Северной Евразии. Использована кластеризация k-means суточных аномалий высоты поверхности 500 гПа в пространстве ведущих эмпирических ортогональных функций. Модельные режимы сопоставлены с режимами реанализа как решение задачи о назначениях: максимизируется суммарная пространственная корреляция пар режимов при заданном пороге. Все четыре режима во всех сезонах и регионах при пороге корреляции 0.3 совпадают с ERA5 только у трёх моделей: GISS-E2-1-G, NorESM2-MM и TaiESM1. Модели лучше описывают зимнюю циркуляцию, чем летнюю, и Евро-Атлантику лучше, чем Северную Евразию. Ближе всего к реанализу пространственная структура зимнего режима NAO– и его летнего аналога SNAO– (медианная корреляция составила 0.96 и 0.90, соответственно). Значимый рост повторяемости NAO+ в ERA5 модели не воспроизводят. Зато в них проявляется рост повторяемости летних режимов Скандинавского блокинга в Евро-Атлантике и Уральского максимума в Северной Евразии. Результаты показывают, что режимный подход надёжен для диагностики зимней евро-атлантической циркуляции в моделях, а летом, особенно над Северной Евразией, его применимость ограничена.

Вклад атмосферных процессов разных временных масштабов в формирование ветрового волнения в Европейском секторе Арктики

Бетке И.А.[1,2], Акперов М.Г.[3], Подчезерцева С.Б.[4], Мысленков С.А.[3,4], Шестакова А.А.[3]
[1]*Факультет аэрокосмических технологий, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
[2]*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
[3]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[4]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
betkeigor@gmail.com

Ключевые слова: *ветровое волнение, Арктика, циклоны, реанализ CARRA2, WAVEWATCH III, частотная фильтрация ветра*

Ветровое волнение арктических морей формируется под воздействием атмосферных процессов различных временных масштабов, включая мезомасштабные и синоптические циклоны, а также низкочастотную изменчивость атмосферной циркуляции. В работе выполнена количественная оценка вклада этих процессов в формирование ветрового волнения Европейского сектора Арктики на основе данных арктического реанализа высокого пространственного разрешения CARRA2 за 1986–2023 гг.

Для моделирования ветрового волнения использована спектральная волновая модель WAVEWATCH III. Расчеты проводились на неструктурированной вычислительной сетке, охватывающей Северную Атлантику, Баренцево и Карское моря (Myslenkov et al., 2023). В качестве атмосферного воздействия использовались поля компонент скорости ветра на высоте 10 м из реанализа CARRA2, разделенные методом частотной фильтрации на три составляющие: мезомасштабную (периоды менее 2 суток), синоптическую (2–6 суток) и низкочастотную (более 6 суток) (Markina et al., 2019). Влияние отдельных составляющих оценивалось путем сопоставления результатов численных экспериментов с контрольным расчетом, выполненным без фильтрации ветрового воздействия. На основе полученных результатов проведен анализ пространственно-временной изменчивости значительной высоты волн.

В результате получены количественные оценки влияния мезомасштабной, синоптической и низкочастотной составляющих атмосферной изменчивости на значительную высоту волн. Особое внимание уделено роли процессов разных временных масштабов в формировании волнового режима Баренцева и Карского морей, а также совместному влиянию атмосферной циркуляции и изменений концентрации морского льда на характеристики ветрового волнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 25-77-31009).

Литература

1. Markina M.Y., Studholme J.H.P., Gulev S.K. Ocean wind wave climate responses to wintertime North Atlantic atmospheric transient eddies and low-frequency flow // Journal of Climate. 2019. Vol. 32, no. 17. P. 5619–5638. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0595.1.
2. Myslenkov S.A. et al. Number of storms in several Russian seas: trends and connection to large-scale atmospheric indices // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 23, no. 3. Art. ES3002. DOI: 10.2205/2023ES000828.

Изменения повторяемости экстремальных осадков 1979-2023 гг. в полярных областях ДВФО по данным архива CPC и станционных наблюдений

Братцева А.Л.
Институт повышения квалификации Росгидромета, Балашиха, Россия
anabellabr@mail.ru

Ключевые слова: *повторяемость экстремальных осадков, полярные области ДВФО, значимые разности*

В настоящем исследовании на территории Дальневосточного федерального округа по данным архива CPC и станционных наблюдений за 1979–2023 гг. ВНИИ ГМИ - МЦД и NCEI (National Centers for Environmental Information) рассматривались нелинейные изменения повторяемости экстремальных осадков (суточная сумма выше 95-го процентиля) на основании значимых разностей повторяемости между 1979 и 2023 гг. Далее отдельно анализировались полярные области ДВФО.

Значимость разностей оценивалась пермутационным тестом с последующими поправками на множественное тестирование при FDR < 0,1: Беньямини–Йекутили для сеточных данных и Беньямини–Хохберга для станционных. Из анализа исключались ячейки сетки и станции, где значение повторяемости в 1979 г. или 2023 г. отклонялось от многолетнего среднего более чем на 2 стандартных отклонения. Для оставшихся точек вычислялись относительные изменения повторяемости — отношение разности между 2023 и 1979 гг. к многолетнему среднему за весь период.

По данным CPC, в полярных широтах преобладают отрицательные изменения повторяемости, причем с весны по осень они выражены сильнее, чем на остальной территории ДВФО: среди 10 точек с наибольшими по модулю отрицательными разностями за Полярным кругом зимой оказалась 1, в остальные сезоны – 8 - 10, тогда как среди 10 точек с наибольшими положительными разностями в полярных широтах представлена лишь одна (летом).

По данным станционных наблюдений значимые различия повторяемости экстремальных осадков между 1979 и 2023 г. в ДВФО за Полярным кругом наблюдаются на 2-5 станциях в зависимости от сезона. Относительные изменения колеблются от -205,62% до 157,07% от многолетнего среднего. Для всех этих станций, согласно критериям AIC и BIC, линейная аппроксимация не имеет существенного преимущества перед квадратической и кубической, и линейных трендов повторяемости экстремальных осадков не выявлено.

Интерес для дальнейшего изучения представляет природа этих изменений — скачки, плато или колебания повторяемости.

Оценки эмиссионных коэффициентов для CO_2, CO, CH_4 и NO в зависимости от типа леса по измерениям состава воздуха в шлейфах пожаров в тайге в Сибири

Васильева А.В.[1], Моисеенко К.Б.[1], Беликов И.Б.[1], Белоусов В.А.[1], Сафронов А.Н.[1], Скороход А.И.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, Vienna, Austria*
av@ifaran.ru

Ключевые слова: *состав атмосферы, газовые примеси, лесные пожары, атмосферные эмиссии*

По измерениям состава воздуха в шлейфах лесных пожаров в Сибири даны оценки эмиссионных коэффициентов (EF_X), характеризующих массу выброса примеси X на 1 кг сгоревшей биомассы, для основных продуктов горения (X есть CO_2, CO, CH_4, NO_x=NO+NO_2). Стадия горения определялась по индексу эффективности горения MCE=1/(1+EF_{CO}/EF_{CO2}). Отмечена сильная изменчивость EF_X и MCE в зависимости от типа горящего леса, определяемого по спутниковой карте типов леса, спутниковым данным о пожарной активности и численным оценкам вклада эмиссий в наблюдения. Оценки EF_{CO2}, EF_{CO}, EF_{CH4} и EF_{NOx} составили 1438–1733, 58–230, 3.4–12.6 и 0.48–1.96 г $кг^{-1}$, соответственно. В шлейфе пожаров в светлохвойном лесу с преобладанием тления (MCE=0.80) получены наименьшие EF_{CO2} и наибольшие EF_{CO}, EF_{CH4} и EF_{NOx}, а в шлейфе пожаров в темнохвойном лесу с преобладанием пламенного горения (MCE=0.95) — наибольшие EF_{CO2} и наименьшие EF_{CO} и EF_{CH4}. Изменчивость EF_X обусловлена разницей в преобладающей стадии горения (EF_{CO2}, EF_{CO}, EF_{CH4}) или в содержании азота в биомассе (EF_{NOx}) в светлохвойном и темнохвойном лесу. Значения EF_X отличаются в 3–4 раза для EF_{CO} и EF_{CH4}, в 1.5 раза для EF_{NOx} и до 20% для EF_{CO2}, при погрешностях 10–35% для EF_{CO} и EF_{CH4}, 25–70% для EF_{NOx} и 10% для EF_{CO}. Приращения озона (O_3) в шлейфах возрастом до суток (для Сибири даны впервые) составили от −0.006–0.065 на молекулу CO, убывая с ростом концентраций CO и NOx в шлейфах из-за снижения эффективности фотохимической наработки озона. Для Сибири получены первые оценки EF_{NOx} по данным натурных измерений и первые оценки EF_{CO2}, EF_{CO} и EF_{CH4} для пламенного горения. Результаты являются очередным шагом в развитии модели оценки эмиссий с учётом региональных особенностей пожаров в тайге для снижения неопределённости итоговых оценок. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 25-77-31009).

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Вклад факторов внешнего воздействия на климат в изменение летних осадков на юге ЕТР

Воронцова В.С.[1,2], Алешина М.А.[1,2], Семенов В.А.[1,2]
[1]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
vrn.vorontsova@mail.ru

Ключевые слова: *экстремальные осадки, Черноморское побережье Кавказа, CMIP6, DAMIP, hist-NAT, hist-GHG, hist-AER, тренды осадков, антропогенные и естественные факторы*

В условиях современных изменений климата интенсивность экстремальных осадков растет почти повсеместно, однако летом на Черноморском побережье Кавказа отмечаются тенденции к уменьшению средних осадков, что может быть связано со сложным взаимодействием факторов, влияющих на формирование осадков в данном регионе.
Для количественной оценки вкладов антропогенного и естественного внешнего воздействия на климат в наблюдаемые изменения летних сумм осадков в работе использованы данные подпроекта DAMIP проекта CMIP6. Проанализирован ансамбль из 10 моделей климата, использующими сценарии внешнего воздействия на климат Historical, hist-NAT (изменение только солнечной активности и вулканов, все антропогенные факторы зафиксированы на уровне 1850 г.), hist-GHG (учтено только воздействие долгоживущих парниковых газов) и hist-AER (оценка влияния антропогенных аэрозолей). Рассматривались изменения осадков на юге ЕТР в XX-XXI вв.
Тренды сезонных сумм осадков различаются для сценариев внешнего воздействия и выбранного периода, а также характеризуются высокой пространственной неоднородностью даже в таком небольшом регионе. В 1931-1960 гг. на Черноморском побережье Кавказа преобладали положительные тренды летних сумм осадков по экспериментам hist-AER и hist-GHG (+20-30 мм/10 лет) и отрицательные – по hist-NAT (-15-30 мм/10 лет). В 1991-2020 гг. летние осадки сильнее всего уменьшаются по эксперименту hist-AER (до -30 мм/10 лет) и увеличиваются по hist-NAT (до +30 мм/10 лет), суммарный тренд по hist-GHG в данном регионе меняется от -15-20 мм/10 лет на Кавказе до +10-15 мм/10 лет в Краснодарском крае и в Прикаспийской низменности. Таким образом, наблюдаемое снижение осадков не объясняется простым откликом на один внешний фактор, а формируется их совместным действием либо внутренней изменчивостью.

Замерзающие осадки и обледенение судов в Арктической зоне России в условиях глобального потепления

Гибадуллина А.И.[1,2], Леонов И.И.[1,3], Соколихина Н.Н.[1], Кислов А.В.[1]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия*
[3]*АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия*
naytask@mail.ru

Ключевые слова: *изменения климата, опасные явления погоды, замерзающие осадки, обледенение судов*

Климатические изменения наиболее интенсивно проявляются в высоких широтах. В Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) риски, связанные с замерзающими осадками и обледенением судов, приобретают особую значимость, поскольку атмосферный лед повреждает инфраструктуру, а брызговое обледенение может привести к потере остойчивости судна. В работе использованы данные реанализа ERA5 и модели INM-CM5 за исторический период и по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Замерзающие осадки выявлялись по механизму «теплого носа» [1]. Для обледенения судов использованы классический индексный метод Д. Оверлэнда и более детальная модель теплового баланса [2]. К концу XXI века прогнозируются разнонаправленные изменения. Ожидается рост повторяемости замерзающих осадков в центральных и северных районах Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири и снижение на юге ЕТР. Ожидается сокращение обледенения судов к западу от Новой Земли и в дальневосточных морях и увеличение в районе Северной Земли. Повторяемость обледенения судов максимальна при SSP2-4.5 и снижается при SSP5-8.5, когда температуры чаще превышают порог замерзания морской воды. Наибольшее число дней с замерзающими осадками за год смещается на восток. Оценки применимы для адаптации инфраструктуры и планирования морских операций.

Литература

1. Kämäräinen M. et al. Estimates of present-day and future climatologies of freezing rain in Europe based on CORDEX regional climate models // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2018. – V. 123. – No. 23. – P. 13291–13304.
2. Overland J. E. et al. Prediction of vessel icing // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1986. – V. 25. – No. 12. – P. 1793–1806.

Качество прогнозирования на сезон-год в линейке моделей INM-CM

Грицун А.С., Тарасевич М.А., Брагина В.В.
Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
asgrit@mail.ru

Ключевые слова: *модель Земной системы, сезонный прогноз погоды*

В работе анализируются данные прогнозирования состояния Земной системы в 1991-2020 гг. с заблаговременностью сезон - год для различных версий модели INM-CM. Делаются выводы о зависимости качества прогнозов от способов инициализации, построения ансамбля начальных условий и характеристик моделей в отношении пространственного разрешения и качества воспроизведения современного климата.

Связь январской концентрации морского льда Баренцева моря с предшествующими значениями индекса Северо-Атлантического колебания: прогностическая оценка

Дубинина А.В.
Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия
mariadubinina9@gmail.com

Ключевые слова: *Баренцево море, концентрация морского льда, Северо-Атлантическое колебание, прогнозирование, временной лаг, линейная модель, LSBoost*

Прогнозируемость льда Баренцева моря ранее оценивалась по температуре океана, состоянию льда и океаническому теплопереносу [1, 2]. Связь зимней концентрации с Северо-Атлантическим колебанием (NAO) характеризуется как умеренная [3]. Для связей между морским льдом Баренцева–Карского региона и NAO показана временная нестационарность [4, 5].

Цель работы: оценить прогностическую информативность предшествующего NAO для январской концентрации морского льда (SIC), устойчивость временного сдвига и различия линейной и нелинейной моделей. Новизна состоит в совместной проверке устойчивости оптимального сдвига и силы связи во времени во вневыборочной схеме.

Использованы среднемесячные данные ORAS5 за 1958–2025 гг. в границах Баренцева моря по Международной гидрографической организации (IHO). SIC < 15 % принималась равной нулю. Проверялись сдвиги NAO 0–6 месяцев. На каждом шаге лучший сдвиг выбирался только по обучающей выборке после детрендирования. Линейная модель использовалась как базовая, бустинг по методу наименьших квадратов (LSBoost) – для проверки нелинейности. Качество оценивалось по r, R^2, среднеквадратичной ошибке (RMSE) и эффективности относительно тренда.

Во всех 37 шагах 1989–2025 гг. выбран лаг 4 месяца (сентябрьский NAO). 21-летние скользящие корреляции показали ослабление отрицательной связи со временем, что согласуется с [4, 5]. Линейная модель дала r = 0,60, R^2 = 0,28, RMSE = 9,99 п.п. и эффективность 3,2 %. LSBoost: r = 0,64, R^2 = 0,33, RMSE = 9,66 п.п. и 9,6 %. Перестановочный тест дал p = 0,027 для R^2, RMSE и эффективности.

Блочный бутстрэп показал, что 95%-й доверительный интервал эффективности LSBoost включает ноль (−0,077…0,328), как и интервалы выигрыша над линейной моделью. Следовательно, улучшение LSBoost умеренно и ограниченно устойчиво; модель не предназначена для оперативного прогноза. Перспективно включение дополнительных атмосферных и океанических предикторов.

Литература

1. Nakanowatari T. et al. // J. Climate. — 2014. — Vol. 27. — P. 8884–8901.
2. Onarheim I.H. et al. // Geophys. Res. Lett. — 2015. — Vol. 42. — P. 5364–5371.
3. Sorteberg A., Kvingedal B. // J. Climate. — 2006. — Vol. 19. — P. 4772–4784.
4. Kolstad E.W., Screen J.A. // Geophys. Res. Lett. — 2019. — Vol. 46. — P. 7583–7591.
5. Strommen K., Cooper F.C. // Geophys. Res. Lett. — 2024. — Vol. 51. — e2023GL107609.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Влияние схемы адвективного переноса морского льда на воспроизведение современного климата Арктики в модели Земной системы ARTS-ESM-M

Ежкова А.А.[1,2,3], Брагина В.В.[1,2], Благодатских Д.В.[1,2], Яковлев Н.Г.[1,2], Оноприенко В.А.[1]
[1]*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
alisa.ezh@yandex.ru

Ключевые слова: *морской лёд, Арктика, ARTS-ESM-M, схема переноса, FCT-BB, UPW, сплочённость, толщина льда, CMIP7, Северный морской путь*

Работа посвящена исследованию чувствительности характеристик морского льда Северного Ледовитого океана к выбору схемы адвективного переноса ледовых полей в модели Земной системы ARTS-ESM-M ([1, 2]), разрабатываемой для участия в CMIP7. Сравниваются: конфигурация со схемой коррекции потоков Залесака с предограничителем Бориса–Бука (FCT-BB) и конфигурация с направленными разностями первого порядка (UPW); остальные параметры модели идентичны. Используются ансамбли исторических экспериментов по протоколу CMIP7 за 1960–2021 гг., спутниковые данные NSIDC и реанализы ERA5 и PIOMAS. Все расчёты выполнены по протоколу CMIP7. Анализируются интегральные метрики площади, объёма и секторальные метрики сплочённости и толщины льда для Центральной Арктики, Атлантического и Тихоокеанского секторов и области Северного морского пути. Интегральные оценки могут скрывать взаимно компенсирующиеся ошибки в отдельных бассейнах, тогда как секторальный анализ позволяет выявить эти ошибки и связать особенности ледового режима с региональными процессами. Показано, что обе конфигурации качественно воспроизводят наблюдаемую эволюцию ледяного покрова, но недооценивают темп сокращения льда в 1990–2010 гг. В мае различия между схемами слабее, чем в сентябре, когда лёд разрежен и кромка наиболее чувствительна к динамике. Схема FCT-BB реалистичнее воспроизводит пространственную структуру полей сплочённости, включая кромку льда в сибирских морях и вынос льда вдоль восточного берега Гренландии, демонстрирует более физически обоснованный разброс ансамбля и улучшает метрики толщины льда в Центральной Арктике и на Северном морском пути, однако немного ухудшает их в Тихоокеанском и Атлантическом секторах. Обсуждаются направления дальнейшего совершенствования модели, включая модернизацию реологии льда и термодинамических параметров.

Литература

1. Ежкова А.А. и др. Assessing the applicability of various transport schemes for the sea ice in the INMCM6 Earth system model // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 2025. Vol. 40, no. 6. P. 439–453.
2. Volodin E. et al. Simulation of present-day climate, its variability, and historical changes with the ARTS-ESM-M Earth system model // ESS Open Archive [preprint]. 2026. DOI: 10.22541/essoar.15008013/v1.

Климатическая адаптация городов миллионеров РФ: ранжирование по жаре, термическому комфорту и другим опасностям

Королёв Г.Г.[1], Константинов П.И.[1,2,3]
[1]*Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen, China*
[3]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*
kostadini@mail.ru

Ключевые слова: *климатическая адаптация городов, термический комфорт, волны жары, города*

Современный интенсивный рост температуры ведет к увеличению экстремальности погодных явлений и, как следствие, создает риски для всех сфер жизни — от физического здоровья людей до устойчивости глобальной экономики и инфраструктуры. Особо уязвимыми к климатическим изменениям из-за высокой плотности населения и сосредоточения инфраструктуры оказываются крупные города.

Однако, для крупных городов Российской Федерации в настоящий момент не существует специальных исследований, посвященных именно ранжированию климатических опасностей. Национальные доклады по климатическим изменениям базируются на рецензируемых работах, посвященных отдельным городам, что не всегда позволяет статистически грамотно сравнивать города между собой. Свою лепту вносит и неоднородность расположения метеостанций Росгидромета в городской черте, подвергая ряды метеонаблюдений разной зависимости от микроклиматических особенностей территории.

Настоящее исследование имеет своей целью как раз сравнение статистически однородных трендов климатических опасностей, таких как подверженность волнам жары, тепловому и холодовому дискомфорту, переходам температуры воздуха через ноль градусов и других для всех 16 городов РФ с населением, превышающим миллион человек.

По результатам стоит отметить, например, тот факт, что наибольшее число дней с тепловым стрессом выше очень сильного (дни, когда физиологически-эквивалентная температура воздуха (PET) хотя бы однажды превышает значение 35°C) за лето зафиксировано в Краснодаре (69 дней), Волгограде (62 дня) и Ростове-на-Дону (57 дней), наименьшее — в Санкт-Петербурге, Екатеринбурге и Перми (менее 20 дней). Наибольшее увеличение повторяемости отмечено в южных городах. Рост ощущаемой температуры (PET) опережает рост приземной во всех городах, особенно в Волгограде (+0,93 °C против +0,87 °C за 10 лет), Краснодаре (+0,90 °C против +0,81 °C) и Санкт-Петербурге (+0,89 °C против +0,81 °C).

Связь Баренцева колебания со структурой «тёплая Арктика–холодная Евразия» в различные сезоны

Латонин М.М.[1,2], Семенов В.А.[1,3], Бабанов Б.А.[1], Акперов М.Г.[1], Ван Л.[1,4]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[4]*Государственная ключевая лаборатория численного моделирования системы Земли и его применения, Институт физики атмосферы, Китайская академия наук, Пекин, Китай*
m.m.latonin@ifaran.ru

Ключевые слова: *Баренцево море, Евразия, Арктика, морской лёд, приповерхностная температура воздуха, внутренняя изменчивость, атмосферная циркуляция*

Баренцево море играет важнейшую роль во взаимосвязанной климатической изменчивости Арктики и Евразии. Это ключевой регион интенсивного теплообмена между океаном и атмосферой, где аномалии морского ледяного покрова и поверхностных потоков тепла могут влиять на крупномасштабную атмосферную циркуляцию над прилегающим Евразийским континентом. В данном исследовании, опираясь на данные реанализа ERA5 и наблюдений за период 1941–2024 гг., рассматривается дипольная структура температурных аномалий — противоположные по знаку отклонения температуры в Арктике и средних широтах Евразии — в контексте Баренцева колебания (БК). Ранее считалось, что данная мода внутренней изменчивости атмосферы проявляется только в зимний период. Мы показываем, что данная структура отчётливо выражена во все сезоны, кроме лета, и является доминирующим фактором, определяющим переходы между двумя климатическими состояниями: «тёплая Арктика–холодная Евразия» (положительная фаза БК) и «холодная Арктика–тёплая Евразия» (отрицательная фаза БК). БК в значительной степени объясняет дипольный характер аномалий приповерхностной температуры воздуха: они достигают максимальных значений в Арктике (преимущественно над Гренландским, Баренцевым и Карским морями) и в средних широтах Евразии (наиболее выражены над юго-западной частью Сибири). Этот вывод подтверждается данными метеорологических станций. Ещё один важный результат заключается в том, что изменчивость БК в осенний период может служить надёжным предиктором площади морского льда в Баренцевом море предстоящей зимой, в то время как изменчивость площади морского льда в Баренцевом море зимой, в свою очередь, может выступать предиктором БК следующей весной.
Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-77-31009, https://rscf.ru/project/25-77-31009/.

Зональные различия предсказуемости ландшафтных пожаров Ямало-Ненецкого автономного округа

Марчукова О.В., Пигарёва А.Е., Миляев И.А.
Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
o.v.marchukova@utmn.ru

Ключевые слова: *ландшафтные пожары, Ямал, индексы пожарной опасности, модель нелинейной регрессии, изменение климата Арктики*

Быстрые климатические изменения в Арктике повышают актуальность оценки предсказуемости ландшафтных пожаров по характеристикам пожарной погоды [1]. Цель работы – определить, насколько метеорологические индексы и параметры пожароопасного периода позволяют воспроизводить межгодовую изменчивость площади и количества пожаров в природных зонах Ямало-Ненецкого автономного округа с 2001 по 2025 гг.

Для южной тундры, лесотундры, северной и средней тайги анализировались индекс Нестерова, индекс МакАртура FFDI, скорость ветра, а также показатели увлажнения растительности и поверхности. Предикторы отбирались по ранговой корреляции Спирмена (ρ) при $p<0,05$ с последующей проверкой мультиколлинеарности. Для площади использовалась модель $\ln(1+A)$ с коррекцией обратного преобразования "Duan smearing", для количества – отрицательно-биномиальная регрессия. Предсказуемость оценивалась методом поочередного исключения каждого последующего года (LOOCV).

Выявлена выраженная зональная смена ведущих факторов. В южной тундре площадь и количество пожаров определялись высокими значениями индекса Нестерова. В лесотундре наиболее информативно сочетание FFDI (P95) и максимального NDMI: для площади $R^2\log=0,59$ и ρLOOCV=0,66, для количества ρLOOCV=0,809. В северной тайге количество пожаров наиболее устойчиво связано с суммарным FFDI (ρLOOCV=0,63), а в средней тайге — со скоростью ветра пожароопасного периода (ρLOOCV=0,49). Полученные результаты показывают, что индексы пожарной опасности позволяют воспроизводить относительную межгодовую изменчивость пожарной активности, однако точность прогноза абсолютных значений существенно зависит от природной зоны. Это обосновывает необходимость зонально-дифференцированного мониторинга пожарной погоды в Арктике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00670, https://rscf.ru/project/25-27-00670/.

Литература

1. Марчукова О.В. и др. Арктика: экология и экономика. 2026. Т. 16, № 1. С. 84–96. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-1-84-96.

Моделирование динамики городского острова тепла в Норильске на основе сценарных прогнозов климата методами машинного обучения

Назмутдинов К.Ф.[1,2,3], Варенцов М.И.[2,3], Чернокульский А.В.[2], Аварский А.К.[4], Васенев В.И.[5]
[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[3]*Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[4]*ПАО ГМК "Норильский никель", Норильск, Россия*
[5]*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия*
nkamil734@gmail.com

Ключевые слова: *городской остров тепла, Арктика, Норильск, климатические проекции, CMIP6, машинное обучение, CatBoost, коррекция смещения*

Арктические города построены на многолетнемерзлых грунтах, деградация которых под действием потепления приводит к деформации зданий и авариям на инфраструктуре. На региональное потепление в городах дополнительно накладывается городской остров тепла (Urban Heat Island, UHI) — положительная разница температур между городом и сельской местностью, — усиливая тепловую нагрузку. Однако в Арктике эффект UHI остаётся недостаточно изученным. В сценарных климатических проекциях, лежащих в основе адаптационной политики, остров тепла не учитывается из-за недостаточного разрешения моделей и отсутствия соответствующих параметризаций. Учёт городского острова тепла важен для корректной интерпретации климатических проекций в арктических городах. В работе предложена методика количественной оценки UHI в условиях будущего климата методами машинного обучения и её апробация на примере Норильска.

В качестве алгоритма машинного обучения использован градиентный бустинг CatBoost [2]. Модель обучена на массивах наблюдений UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) и ArcticSUN. Для прогнозирования выбраны сценарии SSP5-8.5 и SSP1-2.6 (Shared Socioeconomic Pathways) проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) для модели HadGEM3-GC31-MM. Для применения модельных данных к прогнозу UHI до 2100 года выполнена коррекция смещения методом MBCn (Multivariate Bias Correction) на основе квантильного преобразования QDM (Quantile Delta Mapping) [1].

Показано, что зимний UHI формируется температурными инверсиями, которые ослабевают при сильном потеплении (SSP5-8.5), но сохраняются при умеренном сценарии (SSP1-2.6). Летний UHI определяется радиационным балансом, слабо чувствительным к глобальному потеплению. Впервые получена долгосрочная оценка динамики UHI для Норильска. Без учёта UHI локальные зимние температуры недооцениваются до 2–3 °C, что критично для климатических проекций арктических городов.

Литература

1. Cannon A. J. Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables // Climate Dynamics. 2018. Vol. 50, N 1–2. P. 31–49.
2. Nazmutdinov K. F., Varentsov M. I. Comparison of Machine Learning Methods for Accounting Lagged Relationships in Urban Heat Island Modeling // Moscow University Physics Bulletin. 2025. Vol. 80, N S3. P. S1234–S1243.

Аномально высокие концентрации приземного озона в Кисловодске в 2025 г.

Нахаев М.И.[1], Семенов В.А.[1,2], Чернокульский А.В.[1,2], Беликов И.Б.[1], Белоусов В.А.[1], Артамонов А.Ю.[1]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
nakhaev@ifaran.ru

Ключевые слова: *приземный озон, загрязнение атмосферы, Кисловодск, стратосферно-тропосферный обмен, химико-транспортная модель, CHIMERE, качество воздуха*

Приземный озон — вторичный загрязнитель 1 класса опасности. Цель исследования – выявить причины аномально высоких концентраций O_3 в 2025 г. и оценить возможность прогноза с помощью химико-транспортной модели CHIMERE. Использованы данные измерений автоматической станции ИФА им. А.М. Обухова РАН, синоптический анализ, реанализ, обратные траектории и данные радиозондирования. Численные эксперименты проводились с применением модельного комплекса CHIMERE v2023r3 + WRF 4.3, химический блок – MELCHIOR-2, архитектура расчетов включала в себя три вложенных домена с горизонтальным шагом 25 км, 5 км и 1 км. Установлено, что первый эпизод аномально высоких концентраций приземного озона отмечался в начале марта, в целом сезон, когда концентрации приземного озона могут превышать ПДК в Кисловодске, длится с марта по сентябрь. Показано, что мартовский эпизод обусловлен стратосферно-тропосферным обменом. Формирование летних эпизодов связано с фотохимической генерацией. Модель CHIMERE воспроизводит суточный ход O_3 ($r = 0,99$), но завышает концентрации на ~12,7 мкг/м³.

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Типизация полярных мезоциклонов в данных численного моделирования с применением методов машинного обучения

Никитенко-Валиахметов М.Р.[1,2], Гавриков А.В.[1], Кошкина В.С.[1,3]
[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*
shagur-matveyy@mail.ru

Ключевые слова: *полярные мезоциклоны, когерентные структуры, WRF, кластеризация*

Полярные мезоциклоны (ПМЦ) — экстремальные короткоживущие мезомасштабные вихри, играющие важную роль в энерго- и влагообмене Арктики и в формировании опасных погодных явлений. Трудность их изучения и прогнозирования заключается в малых размерах и коротком времени жизни, поэтому ключевыми инструментами исследования остаются в основном ручная разметка спутниковых данных [1]. Цель работы – идентификация вихрей в данных высокоразрешающего численного моделирования в регионе российской Арктики и разработка схемы типизации вихрей для выявления ПМЦ.

В работе использованы данные численной модели WRF с шагом 6 км для региона Северного морского пути за период 2015-2026 гг. В докладе будут представлены результаты для региона Карского и Баренцева морей за 2019 г. Этот регион – ключевая область формирования ПМЦ в Арктике.

Для идентификации вихрей применён критерий когерентных структур Rortex [2]. Он и ряд вспомогательных характеристик атмосферы использовались для ручного трекинга и определения размеров вихрей. В результате было идентифицировано более 3000 вихревых траекторий, прошедших валидацию по существующим каталогам ПМЦ. Для каждого вихря рассчитан набор параметров, включающий классические предикторы ПМЦ [1] и дополнительные физические характеристики. При типизации ПМЦ по данным параметрам использовались определенные методы кластеризации, из которых особенно выделился метод k-means. В результате получены статистически обособленные группы вихрей, различающиеся сочетанием физических характеристик и предполагаемыми механизмами развития. Отметим, что 2 группы, предположительно соответствующие характеристикам ПМЦ, значимо отличались по баротропно-бароклинному механизму развития.

Используя полученную базу данных, в дальнейшем планируется провести валидацию алгоритма автоматического трекинга вихрей. Это позволит масштабировать результат на весь период моделирования. Данный метод типизации будет использоваться при выявлении других типов мезомасштабных вихрей.

Литература

1. Moreno-Ibáñez M., Laprise R., Gachon P. Recent advances in polar low research: Current knowledge, challenges and future perspectives //Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. – 2021. – Т. 73. – №.1. – С. 1-31.
2. Liu C. et al. Rortex—A new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions //Physics of Fluids. – 2018. – Т. 30. – №.3

Усовершенствованный блок построения прогнозов возможного возникновения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России

Петриченко С.А.[1], Калмыкова О.В.[1], Козлов С.В.[1], Дмитриев М.С.[2], Кулижникова Л.К.[1]
[1]*НПО "Тайфун", Обнинск, Россия*
[2]*НИЯУ "МИФИ" Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск, Россия*
kov@feerc.ru

Ключевые слова: *полярные мезоциклоны, российская Арктика, прогноз, индексы неустойчивости, модель WRF, оперативная технология*

В период 2020-2024 гг. была разработана оперативная технология подготовки прогнозов полярных мезоциклонов для акватории Баренцева и Карского морей. Прогноз формируется по результатам постобработки выходной продукции модели WRF, настроенной на счет в пределах заданной области, с использованием авторской методики расчета вероятности обнаружения ПМЦ. По результатам независимых испытаний технологии в ААНИИ оправдываемость прогнозов составила 76%. В настоящее время проводится работа по усовершенствованию технологии главным образом за счет повышения качества исходных данных (продукции модели WRF) и уточнения методики выявления областей ПМЦ.

По первому пункту развернута экспериментальная технологическая линия с новыми расчетными параметрами модели WRF. В частности, уменьшен шаг расчетной сетки с 12 до 8 км, скорректированы границы расчетной области – включена восточная часть акватории Норвежского моря, добавлена возможность усвоения данных наблюдений в модели, проводятся вычислительные эксперименты по выбору оптимального варианта использования этих данных. По второму пункту на основе специально подготовленного размеченного набора данных с областями и центрами ПМЦ пересмотрен состав предикторов в методике их обнаружения.

Исследование выполнено в соответствии с Планом научно-исследовательских работ Росгидромета на 2025-2029 гг. (проект № 125101411563-2).

Экстремальные явления аномального роста черного углерода в периоды Арктической дымки и сибирских пожаров, по многолетним данным в Российской Арктике

Поповичева О.Б.[1], Чичаева М.А.[1], Ковач Р.Г.[1], Марков Е.А.[1], Слободян В.Ю.[2], Касимов Н.С.[1]
[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт экологического проектирования и изысканий, Москва, Россия*
olga.popovicheva@gmail.com

Ключевые слова: *экстремальные явления, Арктика, черный углерод*

В условиях климатических изменений, роста индустриализации, частоты природных пожаров увеличились выбросы загрязняющих веществ, основным индикатором которых является климатически активная компонента сжигания углеводородных топлив и биомасс - черный углерод (BC). Многолетние наблюдения BC на Арктическом Аэрозольном комплексе МГУ «Остров Белый» показали типичный арктический тренд максимума в холодный и минимума в теплый период со средними значениями 44±47 и 19±57 нг/м^3 [1]. Рекордно высокие уровни BC зарегистрированы во время Арктической дымки в феврале 2022 года (110±70 нг/м³). По Лагранжевой транспортной модели FLEXPART с базой антропогенных эмиссии определено влияние ТЭК Западно-Сибирского, Волго-Уральского нефтегазоносных бассейнов и жилого сектора густонаселенных районов Европейской части РФ. Вариации крупномасштабной атмосферной циркуляции приводят к росту экстремальных явлений аномальной жары и площади пожаров. Якутия с температурой до 40°C и низкой влажностью наиболее подвержена лесным пожарам. В августе 2021 года шлейфы якутских пожаров принесли на о. Белый беспрецедентно высокий BC ~ 3400 нг/м^3. Температура 35°C и дефицит осадков 40 мм привели к пожарам в ЯНАО, ХМАО, республике Коми, в Рязанской и Нижегородской областях в августе 2022 г. Аномальный рост BC достиг 851 нг/м^3, а коричневого углерода BrC превысил BC на 1150 нг/м^3 [2]. Экстремальное дымовое загрязнение идентифицировано во время переноса воздушных масс из Красноярского края к Казахстану и далее к Волгоградской и Саратовской областям, на северо-восток к острову Белый. Над Ямалом все лето 2026 г. сохранялись аномальные для приполярных территорий метеоусловия и чрезвычайный класс пожарной опасности. По данным ААК МГУ-РГО «Арктика» в Приуральском районе ЯНАО концентрации BC дымовых шлейфов в 6 раз превысили допожарный уровень [3]. Ямал стал абсолютным лидером среди регионов России по площади пожаров, что привело к аномальному росту климатически активных веществ в атмосфере Арктики.

Литература

1.Popovicheva, O., Chichaeva, M., Evangeliou, N., Eckhardt, S., Diapouli, E., Kasimov, N.S. (2025). Atmospherric Chemistry Physics, 25: 7719-7739.
2.Поповичева, О., Чичаева, М., Ковач, Р., Касимов, Н., Кобелев, В. Синицкий, А. (2023). Лесные пожары как источник черного углерода в Арктике летом 2022 г. Арктика: Экология и Экономика 13: 257-270.
3. https://www.gazeta.ru/science/news/2026/10/02/29440063.shtml

События ледовых перекрытий Севморпути в период летней навигации 2000 – 2025 гг.

Романенко В.А.[1], Семенов В.А.[1,2], Латонин М.М.[1,3]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
[3]*Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург, Россия*
romanenko.victor.geo@mail.ru

Ключевые слова: *морской лед, Северный морской путь, период навигации, проливы*

Россия, являясь арктической державой, заинтересована в исследованиях возможностей плавания судов различных ледовых классов в акватории Северного морского пути (СМП). В исследовании приведены статистические оценки закрытости льдом участков прибрежной трассы СМП. Выявлено, что западная часть Карского моря доступна для плавания судов с малым ледовым классом большую часть периода навигации с начала июля до конца октября. В восточной части Карского моря сплошной ледяной покров наблюдается в среднем в течение полутора месяцев. Сопоставимая продолжительность ледового перекрытия характерна для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. В Чукотском море вероятность встретить сплошной ледяной покров на трассе стремится к нулю. Наиболее трудными участками СМП остаются узкие проливы в архипелагах, которые даже в августе–сентябре часто закрыты льдом.

При значительной межгодовой изменчивости в отдельные сезоны, например, в 2007, 2012 и 2020 гг., практически вся трасса СМП в августе–сентябре полностью освобождалась ото льда. В то же время в 2001 г. значительные площади акваторий к востоку от Карского моря оставались перекрытыми ледяным покровом на протяжении всего навигационного окна. Годам с наибольшей закрытостью СМП льдом соответствовали антициклонические условия, с наименьшей – циклонические. На фоне устойчивого сокращения площади арктического льда продолжительность периода сплошного ледяного покрова вдоль всей трассы СМП в последние десятилетия уменьшается. Наибольшая межгодовая изменчивость числа ледовых дней отмечается в восточной части Карского моря и на западе моря Лаптевых. Участок СМП вблизи Берингова пролива обычно свободен ото льда. Наибольшее сокращение числа дней с ледовым перекрытием произошло в 2000–2012 гг., после чего показатель стабилизировался.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (FMWR-2026-0004)

VI Международная конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
Москва, 17 – 19 ноября 2026 года

Повышение температуры восточной части российской Арктики по данным наблюдений и результатам моделей CMIP6 в 1940–2099 годы

Серых И.В.[1], Трусенкова О.О.[2], Скакун А.А.[3]
[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*
[2]*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия*
[3]*Независимая исследовательница, Санкт-Петербург, Россия*
iserykh@gmail.com

Ключевые слова: *приповерхностная температура воздуха, Арктика, Северный Ледовитый океан, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, модели CMIP6, сценарии SSP*

Исследованы долгопериодные изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в российской восточной Арктике (65 – 85° с.ш., 70° в.д. – 170 з.д.) по результатам моделирования в рамках различных сценариев проекта CMIP6 за 1940–2099 гг. [1]. Анализировался ансамбль из 33 моделей, причем для периода 1940–2014 гг. использовались результаты сценария Historical с радиационным форсингом, основанным на данных наблюдений, а для периода 2015–2099 гг. – результаты сценариев SSP с различным возможным радиационным форсингом. Анализ основан на сравнении среднегодовой ПТВ, осредненной за 30-летние периоды 1940–1969 гг., 1994–2023 гг., 2024–2053 гг. и 2070–2099 гг. Данная методика уже была применена нами к дальневосточному региону России [2].

Результаты моделирования сопоставлены с информацией реанализа ERA5, а также со сведениями, полученными при фактических метеонаблюдениях на 6 репрезентативных метеостанциях региона. Данные реанализа и результаты моделирования показали одинаковое по ERA5 и CMIP6 увеличение средней ПТВ российской восточной Арктики на ~2 °C от 1940–1969 гг. к 1994–2023 гг., причем рост начался после ~1970 г. и усилился после ~2000 г. Пространственная картина потепления от середины XX века к началу XXI века качественно сходна по ERA5 и CMIP6, показывая большее потепление над морскими акваториями, чем над сушей, что по данным ERA5 составляет 2–4 и 1–2 °C соответственно.

Показано, что ожидаемое потепление российской восточной Арктики от 1994–2023 гг. к 2024–2053 гг. слабо различается для разных сценариев SSP, с увеличением средней по региону ПТВ от 2,0±1,0 до 2,8±1,1 °C. Напротив, от начала к концу XXI века повышение ПТВ исследуемого региона будет значительно выше, существенно различаясь между сценариями SSP и составляя в среднем 3,0±1,6, 4,9±1,7, 6,8±2,0 и 8,6±2,3 °C для сценариев SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5 в соответствии с величиной радиационного форсинга.

Литература

1. Серых И.В., Трусенкова О.О., Скакун А.А. Потепление климата российской восточной Арктики по ансамблю моделей CMIP6 за 1940–2099 гг. // Российская Арктика. 2026. Т. 8. № 1. С. 37–53.
2. Серых И.В., Трусенкова О.О. Изменение приповерхностной температуры Дальневосточного региона по данным реанализа ERA5 за 1940–2023 гг. и моделям CMIP6 до 2099 г. // Тихоокеанская география. 2025. № 1. С. 48–62.

Нейросетевое моделирование снежного покрова с использованием сезонных прогнозов по модели INMCM6M

Смирнов М.А.[1,2,3], Хан В.М.[1,2], Борисов Д.В.[1,2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[3]*Университет Иннополис, Иннополис, Россия*
masmirnov-4@yandex.ru

Ключевые слова: *снежный покров, водный эквивалент снега, нейронные сети, сезонный прогноз, моделирование*

Сезонные прогнозы характеристик снежного покрова, получаемые по климатическим моделям, содержат систематические ошибки, связанные с погрешностями начального состояния и физических параметризаций. Для устранения таких ошибок, как правило, применяется коррекция модельного прогноза. В работе предлагается иной подход: нейронная сеть обучается воспроизводить водный эквивалент снега по данным реанализа, используя в качестве входных предикторов прогностические поля модели INMCM6M, климатические нормы, сезонные и статические характеристики подстилающей поверхности. В отличие от традиционной коррекции, такой подход допускает выбор начального состояния, которое из-за высокой инерционности снежного покрова сильно влияет на весь последующий прогноз.

Обучение модели выполнялось для Северного полушария по данным реанализа ERA5 за 1980–2020 годы, качество оценивается по оперативным прогнозам модели INMCM6M с сентября 2024 года по июль 2026 г. по территории Северной Евразии. Результаты предварительных экспериментов показали, что более сложные архитектуры на базе UNet, рекуррентных сетей и др., не обязательно оказываются эффективнее. Поэтому в качестве нейросетевой модели для уточнения прогноза используется набор небольших полносвязных сетей, каждая из которых обучается на своём снежном климате и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния в его пределах. Моделирование выполняется независимо для каждого узла сетки. Прогноз строится с недельным шагом, и на каждом шаге модель оценивает приращение водного эквивалента снега на следующую неделю, используя в качестве основных предикторов аномалии температуры и осадков. По коэффициенту корреляции аномалий полученные результаты заметно превосходят «сырые» модельные прогнозы и инерционную модель, сохраняющую текущую аномалию водного эквивалента снега на весь период прогноза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-31009, https://rscf.ru/project/25-77-31009/.

Оценка связи Сибирского антициклона с крупномасштабными циркуляционными процессами для уточнения сезонных прогнозов

Сумерова К.А.[1], Куликова И.А.[1], Хан В.М.[1,2]
[1]*Гидрометцентр России, Москва, Россия*
[2]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
sum-ksusha@yandex.ru

Ключевые слова: *Сибирский антициклон, атмосферная циркуляция, индексы дальних связей, композитный анализ, сезонная изменчивость*

Сибирский антициклон (СА) как объект долгосрочного метеорологического прогноза (на сезон, месяц) представляет собой крупномасштабную барическую аномалию, возникающую в результате взаимодействия суши, атмосферы, океана и криосферы. В рамках низкочастотной изменчивости атмосферы данный объект характеризуется временными масштабами от 30 до 90+ суток и определяет долгопериодную изменчивость температуры и осадков на значительной части территории Северной Евразии [Морозова, 2014]. Несмотря на то, что связи СА с индексами атмосферной изменчивости в зимний период изучены относительно подробно [Panagiotopoulos et al., 2005], его роль в тёплый сезон остаётся недостаточно исследованной.

Цель работы — выявить сезонную специфику связей СА с ведущими индексами циркуляции и оценить пространственную структуру аномалий с помощью композитного анализа.

Проведённый анализ показал, что связи Сибирского антициклона с индексами атмосферной циркуляции имеют выраженную сезонную специфику: зимой доминируют EU, WA и PNA, летом — POL, EA и WP. Наиболее устойчивой во все сезоны остаётся связь с EU, сохраняющая значимость на протяжении большей части рассматриваемого периода. Композитный анализ полей метеопараметров показал, что зимой при положительной фазе SHI над Сибирью формируется устойчивый гребень в средней тропосфере, сопровождающийся положительными аномалиями приземного давления, отрицательными аномалиями температуры на юге Сибири и в Центральной Азии и дефицитом осадков. Весной и летом аномалии ослабевают по площади и амплитуде. Летом при положительной фазе SHI сохраняется сигнал положительных аномалий H-500 и давления над югом Сибири, а в поле осадков — избыточное увлажнение в полярных районах. Осенью аномалии вновь усиливаются: формируется очаг холода над Монголией. Сравнение изолированных и совместных композитов выявило различия в пространственной структуре аномалий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-31009, https://rscf.ru/project/25-77-31009/

Литература

1. Морозова С.В. Характеристика зимнего Азиатского антициклона на фоне настоящих климатических изменений, Известия Алтайского отделения Русского географического общества. – 2014. – Вып. 1 (35). – С. 55–57.
2. Panagiotopoulos F., Shahgedanova M., Hannachi A., Stephenson D.B. Observed trends and teleconnections of the Siberian high: A recently declining center of action // Journal of Climate. – 2005. – Vol. 18. – P. 1411–1422.

Долгопериодная изменчивость метеорологических условий, способствующих накоплению примесей в приземном слое атмосферы в Северной Евразии

Терехов М.И., Чернокульский А.В., Нахаев М.И.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия
maxim.i.terekhov@gmail.com

Ключевые слова: *НМУ, МПРЗ, загрязнение воздуха, рассеивание частиц, реанализ*

Проанализирована долгопериодная изменчивость частоты условий, способствующих накоплению примесей в приземном слое атмосферы. На основе часовых данных реанализа ERA5 для периода 1940–2025 гг. для территории Северной Евразии рассчитан метеорологический показатель рассеивания загрязнений (МПРЗ), зависящий от скорости ветра, лапласиана геопотенциала, температурной стратификации и осадков. Выделяют три типа МПРЗ, при этом первый тип соответствует условиям с отсутствием рассеивания примесей (при которых формируются так называемые неблагоприятные метеорологические условия, НМУ), третий тип соответствует условиям хорошего рассеивания примесей, второй тип — является промежуточным. Рассчитаны межгодовые и сезонные вариации долей каждого типа МПРЗ в различных регионах России, отдельно оценивается долгопериодная изменчивость МПРЗ разного типа для городов РФ, включая крупные города-миллионники и города, входящие в федеральный проект «Чистый воздух».

На основе полученных данных были выделены районы, в которых наблюдаются тенденции рассеивания примесей, к таким районам относятся южные регионы Восточной Сибири, обширные территории Дальнего Востока, а также территории Монголии и Северного Китая. При рассмотрении конкретных городов было определено, что события с МПРЗ первого типа чаще всего устанавливаются в городах Азиатской части страны, среди которых можно назвать Улан-Удэ и Норильск. Для ряда рассмотренных городов отмечены разнонаправленные тренды изменения частоты МПРЗ 1 типа, при этом для ряда городов обнаружены статистически значимые отрицательные тренды, для двух упомянутых городов, составившие 3,3 и 3,8 часа в год соответственно.

Литература

1. Ткачева, Ю. В. Усовершенствованная технология прогноза метеорологических параметров и условий, влияющих на загрязнение воздуха / Ю. В. Ткачева, И. Н. Кузнецова, М. И. Нахаев // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2022. — № 3 (385). — С. 161–177. — DOI 10.37162/2618-9631-2022-3-161-177. — Текст : непосредственный.

Влияние фёнов на тепловой баланс и таяние ледников залива Грёнфьорд (Шпицберген)

Шестакова А.А.[1], Прохорова У.В.[2], Терехов А.В.[2], Елагина Н.Э.[3], Ромашова К.В.[2], Василевич И.И.[2]
[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*
[2]*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Институт географии РАН, Москва, Россия*
shestakova@ifaran.ru

Ключевые слова: *орографические ветры, Арктика, турбулентные потоки, баланс массы ледника*

Фёны существенно усиливают таяние ледников во многих регионах мира, однако оценки их суммарного вклада в таяние ледников Шпицбергена до сих пор отсутствовали за исключением отдельных эпизодов [1,3]. В работе оценен вклад фёнов в таяние ледников Альдегонда, Западный и Восточный Грёнфьорд (Земля Норденшельда), где темпы потери массы ледников наиболее высоки для архипелага.

Баланс массы и тепла поверхности ледников рассчитан с помощью модели IGRICE [2] с моделью снежного покрова SnowDraw с входными данными из реанализа CARRA, разрешение которого (2.5 км) позволяет явно воспроизводить фёновые эффекты. Параметризации альбедо льда и термической шероховатости уточнены по данным наблюдений. Модель верифицирована по метеорологическим, гляциологическим, гидрологическим и пульсационным измерениям. Типы циркуляции выделены кластерным анализом (k-means) полей приземного ветра CARRA.

Выделены два типа фёнов. При юго-восточных (влажных) фёнах [3] наблюдаются наибольшие скорость ветра и температура воздуха, а основным источником энергии для таяния становится турбулентный поток явного тепла при заметном вкладе скрытого. Восточные (условно сухие) фёны [1] в заливе Грёнфьорд выражены слабо из-за ветровой тени. Рост коротковолнового баланса («фёновое окно») здесь во многом компенсируется длинноволновым выхолаживанием, а турбулентные потоки оказываются не всегда достаточно велики для поддержания таких же высоких темпов таяния, как при юго-восточных фёнах.

Несмотря на низкую повторяемость в период абляции, фёны благодаря интенсификации таяния обеспечивают 26–29% годового таяния (юго-восточные – 15–17%, восточные – 12%), а весной и осенью – до 35–37%. Их вклад в наблюдаемый речной сток составляет 23–24%, модель воспроизводит его с ошибкой 1.5–3%. Поскольку залив Грёнфьорд не относится к районам, наиболее подверженным фёнам, в других частях архипелага их вклад, вероятно, выше.

Литература

1. Shestakova, A. A., et al. (2022). The foehn effect during easterly flow over Svalbard. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(2), 1529-1548.
2. Toropov, P. A., et al. (2025). The New IGRICE Model as a Tool for Studying the Mechanisms of Glacier Retreat. Climate, 13(12), 248.
3. Шестакова, А. А., и др. (2026). Вклад фёнового эффекта в таяние ледников залива Грёнфьорд (Шпицберген) на примере эпизода 4–5 августа 2025 года. Лёд и Снег, 66(1), 81-90.

Влияние морского льда на эволюцию полярного мезоциклона (на примере случая 15–16 марта 2021 г. над Баренцевым морем)

Яровая Д.А.
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
darik777mhi-ras@mail.ru

Ключевые слова: *полярный мезомасштабный циклон, мезомасштабное атмосферное моделирование, численный эксперимент, морской лед, модель PWRF, баланс энергии*

Полярные мезомасштабные циклоны (ПМЦ) − интенсивные вихри, часто возникающие над высокоширотными морями. Цель работы – исследовать, как морской ледяной покров влияет на их усиление. Для этого с помощью модели PWRF рассмотрен случай интенсивного ПМЦ над Баренцевым морем 15–16 марта 2021 г. Особенность этого случая в том, что циклон формировался и двигался вдоль кромки льда: его северная часть на стадии развития находилась над ледяным покровом, а южная − над открытой водой. В основном расчёте циклон достиг значительной интенсивности: скорость приповерхностного ветра в нём достигала 30 м/с. Главным фактором усиления были большие потоки тепла с поверхности моря (до 1000 Вт/м²), вызванные мощной адвекцией холодного воздуха с ледяного покрова на относительно тёплую воду.

Проведён численный эксперимент: морской лёд в расчетной области заменён открытой водой с температурой замерзания. В результате температура приповерхностного воздуха в северной части ПМЦ повысилась, а в западной части уменьшилась разность температур море−атмосфера. Это привело к уменьшению там потоков явного и скрытого тепла от поверхности моря. Кроме того, высота пограничного слоя в циклоне увеличилась почти в два раза, а устойчивость в нижней тропосфере уменьшилась. Однако, несмотря на это, в эксперименте ПМЦ не достиг той же интенсивности, что в основном расчете. Анализ баланса кинетической энергии выявил две главные причины. Во-первых, удаление морского льда привело к уменьшению радиального градиента давления в нижней тропосфере (перепад давления между центром и периферией упал на ~2 гПа) и, как следствие, уменьшилась работа силы барического градиента. Во-вторых, без льда циклон потерял осесимметричность, принял эллиптическую форму, что привело к перераспределению части кинетической энергии из среднего вращения в энергию пульсаций.

Таким образом, в нашем случае морской лёд являлся важным фактором усиления ПМЦ: поддерживал сильный радиальный градиент температуры и осесимметричную структуру циклона.

Литература

1. Яровая Д. А., Ефимов В. В. Баланс энергии в полярном мезоциклоне над Баренцевым морем // Морской гидрофизический журнал. 2023. № 1. С. 5–20.
2. Adakudlu M., Barstad I. Impacts of the ice-cover and sea-surface temperature on a polar low over the Nordic seas: a numerical case study // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 1716–1730.

Содержание

Секция I. Турбулентность в атмосфере и океане

Благодатский И.Г., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г. **Структурные функции квазидвумерной турбулентности в кольцевом канале при МГД-возбуждении** 7

Богушевич А.Я., Багинский В.В., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Мирсанов М.А., Тельминов А.Е. **Воздействие жидких осадков на характеристики турбулентности и типы стратификации приземного слоя атмосферы** 8

Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г. **Чувствительность расчётов океана и морского льда для Баренцева моря к схемам вертикального турбулентного перемешивания в ROMS–CICE** 9

Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Крамар В.Ф. **Крупномасштабная турбулентность атмосферного пограничного слоя: статистические закономерности и асимметрия субмезомасштабных структур** 10

Вульфсон А.Н., Николаев П.В.
Теория локального подобия, включающая спектральный путь перемешивания Прандтля и второй момент вертикальной скорости. Приложение к турбулентности в конвективных пограничных слоях атмосферы и океана 11

Горчаков Г.И., Гущин Р.А., Карпов А.В. **Структура ветропесчанного потока и механизмы сальтации** 12

Гритчин Д.М., Ежов А.Д., Янышев Д.С.
Летающая лаборатория на базе планера для исследования конвективных потоков и проверки моделей автономного парения БВС 13

Емекеев И.А., Струнин М.А. **Моделирование вертикальных распределений постоянной структурной функции флюктуаций показателя преломления воздуха в тропосфере и стратосфере по данным стандартного радиозондирования** 14

Иванова А.Р., Комасько Н.И., Скриптунова Е.Н. **Исследование авиационной турбулентности по реальным данным и возможности ее воспроизведения с использованием реанализа и модели численного прогноза погоды** 15

Казаков Д.А., Чухарев А.М., Мизюк А.И. **Сопоставление параметризаций вертикального турбулентного обмена в одномерной модели Чёрного моря** 16

Калинин С.Д., Закиров М.Н., Малиновская Н.А., Козлов Н.О.
Методы идентификации конвективных структур 17

Капустин Е.А., Акперов М.Г., Бокучава Д.Д., Семенов В.А., Чхетиани О.Г., Вазаева Н.В., Бабанов Б.А. **Изменчивость турбулентности ясного неба над Центральной частью Европейской территории России по данным реанализа высокого разрешения** 18

Козьмина А.С., Галиченко С.В., Анисимов С.В. **Связи скорости ветра и турбулентной энергии со структурой тензора напряжений Рейнольдса в приземном слое атмосферы** 19

Копылов Е.А., Одинцов С.Л. **Вопросы корректной оценки размера атмосферных астрономических изображений** 20

Коржуев В.А., Чухарев А.М., Козлов И.Е. **Каскадная перемежаемость поля скорости диссипации по взаимной ковариации двух датчиков сдвига** 21

Кузнецов Е.А., Кочурин Е.А. **Спектры турбулентности, генерируемые сингулярностями** 22

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г. **Пылевые структуры над нагретой поверхностью** 23

Мамонтов А.Е., Горбунов М.Е. **Возможности самолётного лидарного зондирования для исследования атмосферной турбулентности: эффект усиления обратного рассеяния и проект DELICAT** 24

Павлов М.И. **Модуляция скорости диссипации турбулентной кинетической энергии в приповерхностном слое моря в условиях Ленгмюровской турбулентности: результаты комплексных натурных измерений** 25

Соленая О.А., Чхетиани О.Г., Шишов Е.А., Курганский М.В., Копров В.М., Безверхний В.А. **Об относительной плотности спиральности в приземном слое** 26

Сухановский А.Н., Семин М.А., Беляева А.В., Попова Е.Н., Файнбург Г.З., Таций А.В. **Моделирование турбулентных течений в длинных каналах** 27

Чечин Д.Г., Янышев Д.С., Ежов А.Д., Зайцева Д.В., Шишов Е.А., Артамонов А.Ю., Мортиков Е.В., Дебольский А.В., Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г. **Термическая конвекция в атмосферном пограничном слое над степной поверхностью: вихреразрешающее моделирование и сопоставление с натурными измерениями в Цимлянске** 28

Чухарев А.М., Павлов М.И., Коржуев В.А., Павленко О.И. **Вклад штормовых волн и ленгмюровских циркуляций в вертикальный турбулентный обмен** 29

Шелехов А.П., Тельминов А.Е., Капустин С.Н., Капустина А.С., Поплевина О.Н. **Использование БПЛА коптерного типа для мониторинга атмосферной турбулентности в городском каньоне** 30

Широков И.А., Елизарова Т.Г., Янышев Д.С. **Применение квазигазодинамического алгоритма для расчета конвективного теплообмена в атмосферном пограничном слое** 31

Шишов Е.А., Воловодов А.А., Зайцева Д.В. **Обобщение результатов пульсационных измерений атмосферной турбулентности** 32

Юшков В.П. **Парадигма теории турбулентности** 33

Юшков В.П., Курбатов Г.А. **Масштаб приспособления к приближению Буссинеска в турбулентности за решёткой** 34

Янышев Д.С., Ежов А.Д., Гритчин Д.М. **Рекуррентная нейросетевая модель управления парящим полётом БПЛА в конвективном пограничном слое атмосферы по данным вихреразрешающего моделирования** 35

Секция II. Геофизическая гидродинамика

Аракелян Е.М. **Энергетическая эффективность и структурная устойчивость композитных вихревых моделей Большого Красного пятна Юпитера** 36

Благодатских Д.В., Ежкова А.А., Оноприенко В.А., Яковлев Н.Г. **Сравнительный анализ изменчивости уровня океана для разных версий климатической модели океана ИВМ РАН** 37

Гончаров В.П. **Динамика экваториальных тепловых пятен** 38

Егорова В.М. **Собственные моды захваченных топографических волн Россби и число струй Антарктического циркумполярного течения над хребтом Шеклтона в проливе Дрейка** 39

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э. **Свойства турбулентных течений при различных условиях их формирования** 40

Жмур В.В., Красильников Д.С., Жук В.Р. **Оценка агеострофической компоненты течений для морских мезомасштабных движений при умеренных числах Россби по данным спутниковой альтиметрии на примере Черного моря** 41

Ингель Л.Х. **О переносе массивных частиц атмосферными течениями** 42

Ингель Л.Х. **Об эффекте обращения направления конвекции при турбулизации двухкомпонентной жидкости** 43

Ингель Л.Х., Макоско А.А. **«Сверхспиральность» распространенных типов атмосферных течений** 44

Калашник М.В., Чхетиани О.Г. **Регулярные и стохастические режимы пространственно-периодических течений** 45

Клиорин Н.И., Кузанян К.М., Рогачевский И.В. **Исследование транспортных и корреляционных свойств турбулентных течений на примере однородного и изотропного случая** 46

Кочин А.В. **Величина внутримассовой силы плавучести в окружающей среде конечных размеров** 47

Кривоносова О.Э., Жиленко Д.Ю. **Неустойчивость Тейлора-Куэтта в присутствии внешнего шума** 48

Кривоносова О.Э., Жиленко Д.Ю. **Закономерности генерации средних течений под воздействием внешнего шума** 49

Кузанян К.М., Клиорин Н.И., Рогачевский И.В. **Лабораторные и численные исследования внутренних гравитационных и инерционных волн в конвекции и их связь с 5-минутными колебаниями на Солнце** 50

Курганский М.В. **Теоретическая модель бароклинного конического вихря (с приложениями к атмосферным пыльным вихрям)** 51

Оноприенко В.А., Благодатских Д.В., Ежкова А.А., Яковлев Н.Г. **Глобальная триполярная сетка с повышенным разрешением в Арктике: проектирование, интеграция в модель океана и адаптация вычислительного ядра** 52

Очиров А.А. **Волновые и лигаментные компоненты поверхностных течений в различных моделях гетерогенных жидкостей** 53

Фрик П.Г., Сухановский А.Н., Степанов Р.А., Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. **Чувствительность общей циркуляции атмосферы и бароклинных волн к условиям на подстилающей поверхности** 54

Чашечкин Ю.Д. **Энергетика, динамика и структура атмосферных течений** 55

Секция III. Общая циркуляция атмосферы, динамика и предсказуемость атмосферных и климатических процессов

Lin Wang **Long-term changes in the Northern Hemisphere marine cold air outbreaks during boreal winter** 56

Абдуллозода С.Ф., Нодирзода К.А. **Анализ климатических изменений и гидротермического режима в Центральной Азии (1982–2021 гг.)** 57

Академик РАН Дымников В.П., Крупчатников В.Н., Градов В.С. **О применении асимптотических законов сохранения двумерной жидкости к анализу структурных изменений крупномасштабной динамики атмосферы при глобальном потеплении климата** 58

Акперов М.Г. **Циклоническая активность в высоких широтах Северного полушария: изменения и последствия** 59

Алдонина Т.А., Семенов В.А. **Ключевые сроки сокращения арктического морского льда в моделях CMIP: параметрический подход** 60

Александров Г.А. **Несоответствие моделируемых изменений климата широтному градиенту климатических условий Русской равнины** 61

Александров Г.Г. **Сценарные оценки изменения климатического индекса отопительной нагрузки в России до 2100 года** 62

Алексеев Г.В., Харланенкова Н.Е., Глок Н.И., Смирнов А.В. **Влияние ТПО в низких широтах на предсказуемость межгодовых колебаний и аномалий климата** 63

Алешина М.А., Семенов В.А. **Вклад естественных и антропогенных факторов внешнего воздействия на климат в изменения характеристик волн жары на Европейской территории России в период 1850-2100 гг. по данным экспериментов DAMIP** 64

Астахова Е.Д., Бундель А.Ю. **Ансамблевые краткосрочные региональные прогнозы на основе модели ICON с использованием отечественной входной информации** 65

Безотеческая Е.А. **Пространственное распределение и изменчивость струйных течений в Атлантико-Евразийском регионе за 1980–2024 гг.** 66

Бекряев И.Р. **Особенности динамики Эль-Ниньо в нелинейной модели Recharge Oscillator** 67

Бекряев Р.В. **О проблемах предсказуемости изменений климата** 68

Белов А.Е., Парфёнова М.Р., Аржанов М.М., Ракитин В.С. **Результаты сопоставления характеристик снежного покрова по данным реанализа ERA5-Land и спутникового прибора MODIS** 69

Блинов Д.В., Шувалова Ю.О., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Смирнов А.В. **Региональный анализ на основе конвективно-разрешающей конфигурации COSMO-Ru с шагом 2,2 км** 70

Блинов П.Д., Чернокульский А.В., Бугримов А.В., Ярынич Ю.И. **Поиск устойчивых метеорологических режимов формирования опасных конвективных явлений на территории России методами кластеризации** 71

Бокучава Д.Д., Мальцева А.С., Алдонина Т.А., Семенов В.А. **Воспроизведение Атлантической мультидекадной и Тихоокеанской декадной осцилляций в моделях CMIP6 и их связь с приземной температурой воздуха и морским льдом Арктики** 72

Брагина В.В., Володин Е.М. **Анализ радиационных форсингов для модели Земной системы ARTS-ESM-L в рамках проекта CMIP7** 73

Бугримов А.В., Чернокульский А.В. **Климатология крупного града в Северной Евразии** 74

Бундель А.Ю., Блинов Д.В. **Оценки прогноза количества осадков и отражаемости в модели COSMO-Ru2By с помощью пространственных методов верификации** 75

Вильфанд Р.М., Куликова И.А., Хан В.М., Макарова М.Е. **Нейросетевой подход к кластеризации и оценке предсказуемости структур атмосферной циркуляции и связанных с ними волн тепла в Северной Евразии** 76

Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г. **Вклад вариаций солнечной постоянной в климатическую изменчивость: от механизмов полярного усиления до пределов предсказуемости** 77

Володин Е.М., Брагина В.В., Черненков А.Ю., Тарасевич М.А., Кострыкин С.В. **Воспроизведение изменений климата моделью Земной системы ARTS-ESM в рамках программы сравнения климатических моделей CMIP7** 78

Гаврильева Г.А., Аммосов П.П., Николаев Е.М. **Сезонный режим области мезопаузы над Якутией: температурные характеристики и ветровые наблюдения** 79

Гекова А.В., Латышева И.В., Лощенко К.А., Вологжина С.Ж., Бреусова Ю.А. **Исследование отклика тропосферы и стратосферы на события ЭНЮК** 80

Гинзбург А.С., Логофет Д.О., Александров Г.А., Белова И.Н., Голубятников Л.Л., Завалишин Н.Н., Казанцев В.С., Докукин С.А., Помелова М.А., Александров Г.Г., Кривенок Л.А., Фалалеева В.А.
Пять десятилетий развития математической экологии: наземные экосистемы, популяционная динамика, термический комфорт 81

Гостев К.С., Чернокульский А.В. **Характерные крупномасштабные условия смерчегенеза в регионах Северной Евразии за период 2012-2026 гг. по данным реанализа ERA5** 82

Гущина Д.Ю., Гвоздева А.В. **Отклик циркуляции внетропической тропосферы и стратосферы на Эль-Ниньо в условиях меняющегося климата** 83

Диденко К.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В., Маурчев Е.А. **Динамические предвестники внезапных стратосферных потеплений с расщеплением и смещением стратосферного полярного вихря** 84

Докукин С.А.
WRF моделирование метеопроцессов в московской агломерации в сухой летний период с использованием различных городских параметризаций 85

Дьякова Е.А., Акперов М.Г., Бабанов Б.А.
Оценка изменений режима осадков над Европейской территорией России в XXI веке по расчётам климатической модели ИВМ РАН 86

Дубчак И.А.[1], Чернокульский А.В.[2], Иньшаков А.В. **Развитие инструментов управления климатическими рисками в транспортной области** 87

Елисеев А.В., Плосков А.Н., Семенов В.А. **Эволюция климата последних 26 тыс. лет в модели Земной системы ИФА РАН** 88

Ерошкина Н.А., Бугримов А.В., Коренев Д.П., Павлюков Ю.Б., Серебрянник Н.И., Чернокульский А.В. **Радиолокационные характеристики градовых облаков и эффективность их обнаружения на ДМРЛ-С** 89

Ерошкина Н.А., Чернокульский А.В. **Анализ долгопериодных изменений высоты нижней границы конвективной облачности в 1976 – 2025 гг.** 90

Ильющенкова И.А. **Особенности атмосферной циркуляции, связанные с волнами тепла на арх. Шпицберген в холодный период года**.....91

Кадышевич Е.А., Островский В.Е.
Климатические условия в Москве и в городах сравнения в настоящем, прошлом и ближайшем будущем как результат изменения турбулентности атмосферы: основные факторы влияния, теория и действительность.....92

Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Богатырев Д.А.
Моделирование долгоживущих сильных шквалов в лесной зоне России с помощью модели WRF.....93

Калмыкова О.В., Спрыгин А.А., Вязилов А.Е., Козлов С.В., Ингель Л.Х., Кулижникова Л.К. **Экспериментальные критерии оценки угроз формирования опасных конвективных явлений для Европейской территории России**.....94

Климович Г.П., Мурышев К.Е. **Зависимость режима колебаний уровня Каспийского моря от параметров притока, испарения и стока в залив Кара-Богаз-Гол**.....95

Колтовской И.И., Ноев Е.Н., Тыщук О.В., Аммосов П.П. **Наблюдение внутренних гравитационных волн во время внезапного стратосферного потепления по данным камеры всего неба**.....96

Коспанов А.А., Ривин Г.С., Розинкина И.А. **Применение методов машинного обучения для статистической коррекции численного прогноза погоды оперативной системой COSMO-Ru**.....97

Кострыкин С.В., Володин Е.М., Черненков А.Ю., Тарасевич М.А.
Глобальный и региональный отклик климатической системы на выбросы CO_2, заданные по протоколам FLAT10MIP, полученный с помощью модели земной системы ARTS-ESM-L.....98

Куминов А.А. **Поиск эффектов 11-летних циклов солнечной активности в исторических данных метеорологического ракетного зондирования Центральной аэрологической обсерватории**.....99

Латонин М.М., Яковлева Д.А., Смирнова Ю.Е., Травкина О.С., Шалина Е.В., Гнатюк Н.В. **Сезонное влияние атмосферной циркуляции на аномалии площади морского льда в морях Российской Арктики в течение 1980–2024 гг.**.....100

Локощенко М.А., Горбаренко Е.В., Ваховская З.С.
Климат Москвы и его современные изменения.....101

Лоскутов Е.М., Гаврилов А.С., Селезнев А.Ф., Фейгин А.М.
Ансамблевые методы декомпозиции пространственно-распределенных данных для анализа и предсказательного моделирования климатической системы.....102

Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А. **Траекторный анализ процессов переноса в атмосфере Арктики в зимний период 2018 г. и 2021 г. до и после внезапного стратосферного потепления**.....103

Макштас А.П., Ильин Г.Н., Большакова И.И., Махотина И.А., Масловский А.С., Быков В.Ю. **Влагосодержание полярной атмосферы по данным радиозондирований и радиометров водяного пара** 104

Малахова В.В. **Пузырьковый перенос метана: параметризация и модельные оценки для арктического шельфа** 105

Маратканова В.С., Константинов П.И. **Оценка будущих условий летнего термического комфорта на территории Северной Евразии** 106

Михайлов Р.П., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. **Зависимость температурной чувствительности молний и частоты возгораний природных пожаров от типа внешнего воздействия на земную систему по расчётам с моделью ИФА РАН** 107

Мурышев К.Е. **К вопросу о полимодальности распределения уровня Каспийского моря** 108

Мухин Д.Н., Сафонов С.Е. **Нелинейный подход к анализу ансамблей моделей земной системы на примере динамики Эль-Ниньо — Южного колебания** 109

Нарижная А.И., Чернокульский А.В., Латонин М.М., Семенов В.А., Wan L. **Облачность и облачно-радиационный эффект в Арктике: сравнительный анализ глобальных моделей CMIP6 и спутниковых данных CERES** 110

Новикова А.А., Железнова И.В., Володин Е.М. **Удаленный отклик на два типа Эль-Ниньо в полях основных метеорологических величин по данным модели ARTS-ESM-M и реанализа ERA5** 111

Ныров А.О., Елисеев А.В. **Учёт влияния тропосферных сульфатов на перенос радиации в модели промежуточной сложности** 112

Панасик А.В., Зюляева Ю.А., Гулев С.К. **Роль фонового состояния тропосферы в передаче стратосферного сигнала к океану в субполярной Северной Атлантике** 113

Парфенова М.Р., Аржанов М.М. **Динамика южной границы снежного покрова Евразии в апреле по данным MODIS и ERA5-Land (2000-2026)** 114

Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В., Мирсаева Н.А., Аухадеев Т.Р., Николаев А.А. **Тенденции изменения и взаимосвязь метеорологических полей Северного полушария в условиях современного потепления климата** 115

Петров Н.А., Чубарова Н.Е., Шатунова М.В. **Применение облачного алгоритма Tripleclouds для оценки коротковолновой радиации в модели ecRad: тестирование и пути совершенствования** 116

Пискунова Д.А., Шувалова Ю.О., Бундель А.Ю., Чубарова Н.Е., Блинов Д.В., Шатунова М.В. **Оценка качества воспроизведения поля осадков в модели ICON-Ru с использованием пакета верификации MET** 117

Плосков А.Н., Елисеев А.В. **Влияние антропогенного воздействия, изменения параметров орбиты Земли и климатической чувствительности на состояние ледовых щитов Северного полушария в будущие тысячелетия** 118

Рахматулла Н.Е., Наурозбаева Ж.К. **Многолетняя динамика грозовой активности на юге Казахстана в контексте современных климатических изменений** 119

Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Никитин М.А., Шатунова М.В.
Оперативная система COSMO-Ru численного прогноза погоды Гидрометцентра России: состояние и дальнейшее развитие 120

Рубченя А.В., Май Р.И.
Прогностическая вероятностная модель изменения припая 121

Рябова С.А., Шалимов С.Л.
О зависимостях вариаций электрических и магнитных полей приземной атмосферы от метеопараметров холодных атмосферных фронтов 122

Селезнев А.Ф., Буянова М.Н., Кравцов С.В., Гаврилов А.С., Лоскутов Е.М., Фейгин А.М.
Собственная изменчивость и вынужденный отклик температуры океана в данных наблюдений и моделях Земной системы 123

Соколова У.О., Иванова А.Р.
Изменчивость характеристик струйных течений в Южном полушарии по данным аэрологического зондирования за период 2001-2025 гг. 124

Солдатенко С.А., Кравец К.А.
Климат как система автоматического регулирования 125

Тарасевич М.А., Володин Е.М. **Модель земной системы ИВМ РАН поколения CMIP7 в применении к ретроспективным прогнозам на зимний сезон** 126

Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Алипова К.А., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Бирючева Е.О. **Развитие глобальной модели атмосферы ПЛАВ в контексте участия в проекте WP-MIP** 127

Умеренков И.А., Гущина Д.Ю., Гвоздева А.В.
Вклад внутрисезонной тропической изменчивости в генерацию Эль-Ниньо в будущем климате по данным моделей CMIP6 128

Фадеев Р.Ю., Толстых М.А. **Описание облачно-радиационных связей в глобальной модели атмосферы ПЛАВ** 129

Фалалеева В.А., Акперов М.Г., Белова И.Н., Гинзбург А.С., Докукин С.А.
Динамика продолжительности периода термического комфорта в городах азиатской части России по климатическим сценариям 130

Цветкова Е.Ю., Школьник И.М. **Будущие изменения взрывных циклонов по оценкам моделей CMIP6** 131

Черненков А.Ю., Володин Е.М. **Обратные связи в системе углеродный цикл – климат в национальной модели Земной системы ARTS-ESM** 132

Шашкин В.В., Гойман Г.С., Марханов Д.А., Третьяк И.Д. **Перспективная модель атмосферы на сетке кубическая сфера, результаты эксперимента AMIP** 133

Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Ярынич Ю.И., Ажигов И.О. **Ветровалы в лесной зоне России, вызванные шквалами и смерчами, и условия их возникновения по данным реанализа ERA5** 134

Секция IV. Состав атмосферы и перенос примесей

Артамонова М.С., Обвинцев Ю.И., Сеник И.А. **Микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля на высокогорном плато Шаджатмаз в мае 2000 года** 135

Артамонова М.С., Чхетиани О.Г., Лапченко В.А., Максименков Л.О., Иорданский М.А. **Экспериментальные исследования аэрозоля в Крыму: зима и весна 2024-2025 гг.** 136

Артамонова М.С., Чхетиани О.Г., Сеник И.А., Лапченко В.А., Иорданский М.А., Максименков Л.О. **Экспериментальные исследования аэрозоля на 3-х станциях юга России в 2025 г.** 137

Ахмадалиева С.Х., Пустовалов К.Н., Нагорский П.М. **Связь вариаций приземного электрического поля с аэрозольной оптической толщей в условиях задымления атмосферы над г. Томском** 138

Барановский Н.В. **Процессы сажеобразования и фрагментации нагретых углеродистых частиц при лесных пожарах** 139

Барановский Н.В., Голов Е.Е. **Исследование теплового воздействия аэрозоля и нагретых углеродистых частиц на ткани верхних дыхательных путей при лесных пожарах** 140

Беляев А.Н., Николайшвили С.Ш., Репин А.Ю. **Тепловой эмиссионный слой в атмосфере Земли** 141

Березина Е.В., Васильева А.В., Губанова Д.П., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Артамонов А.Ю., Моисеенко К.Б. **Влияние высоты слоя перемешивания на приземное содержание загрязняющих примесей в городском воздухе по измерениям на станции ИФА РАН в центре г. Москвы** 142

Борисов Д.В., Виноградова А.А., Губанова Д.П., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е. **Регрессионная оценка аэрозольного загрязнения воздуха весной в Московском регионе на сетке с разрешением 250 метров** 143

Боровский А.Н. **Однородность многолетнего ряда сумеречных измерений стратосферного NO_2 в Звенигороде при смене спектральной аппаратуры** 144

Булохов А.В., Медведков А.А.
Метановая эмиссия в секторе нефтедобычи Северного моря: важнейшие источники и пространственные масштабы влияния 145

Варгин П.Н., Цветкова Н.Д., Лукьянов А.Н., Егорова Т.А., Розанов Е.В.
Влияние химических процессов в стратосфере Арктики на параметры стратосферы и тропосферы по результатам расчётов ХКМ SOCOLv3 146

Вишняк А.Р., Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В.
Межгодичная изменчивость массовых концентраций черного углерода и угарного газа в воздушном бассейне г. Москвы 147

Гибадуллин Р.Р., Гущина Д.Ю., Горбаренко Е.М., Железнова И.В., Масляшова А.О., Осипов А.М., Тарасова М.А., Ольчев А.В. **Отклик нетто-экосистемного обмена CO_2 лесных экосистем внетропических широт на волны жары** 148

Голиков А.Д., Чубарова Н.Е., Кирсанов А.А.
Сравнительный анализ радиационных эффектов антропогенного аэрозоля в модели ICON-ART с использованием новой оптической модели 149

Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Гущин Р.А. **Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в экстремальных смогах и дымах** 150

Губанова Д.П. **Сходства и различия состава городского аэрозоля при нетипичных воздействиях разного происхождения** 151

Гущин Р.А., Горчаков Г.И., Карпов А.В. **Распределение частиц дымового аэрозоля по размерам при степных пожарах в саванне** 152

Даценко О.И. **Поглощательная способность аэрозоля в зимних и летних смогах и дымках г. Пекина в 2012–2013 гг.** 153

Иванов В.Н., Коршунов В.А., Чхетиани О.Г., Перминов В.И., Суходоев В.А., Семенов В.А. **Совместные наблюдения средней атмосферы в Звенигороде и Обнинске с помощью лидарного комплекса АК-3** 154

Ильин И.С., Громов С.А., Гусев А.В., Жигачева Е.С.
Модельная оценка трансграничного переноса первичных аэрозольных частиц в восточной части России 155

Казанцев В.С., Кривенок Л.А., Тананаев Н.И., Израпил Р.И., Шадрина А.А., Тихонов С.А. **Суточная и сезонная динамика эмиссии метана и диоксида углерода из прибрежных болот полуострова Камчатка** 156

Карпов А.В., Горчаков Г.И., Козлов В.С., Степанова Е.В., Гущин Р.А.
Недельный цикл, межсуточные вариации и синоптическая изменчивость массовой концентрации черного углерода в воздушном бассейне г. Москвы 157

Карпов А.В., Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Вишняк А.Р., Козлов В.С., Степанова Е.В., Гущин Р.А. **Долгопериодная трансформация суточного хода черного углерода и тонкодисперсного аэрозоля в воздушном бассейне г. Москвы** 158

Кириллова Н.С., Ракитин В.С., Фёдорова Е.И., Шилкин А.В., Штабкин Ю.А.
Влияние метеорологических условий на характеристики вариативности общего содержания монооксида углерода в Московском мегаполисе 159

Колесников П.В., Нахаев М.И., Боровский А.Н., Сеник И.А.
Сравнительный анализ методов обратного траекторного анализа при идентификации источников пылевых выносов в районе Кисловодска 160

Коновалов И.Б., Головушкин Н.А.
Обратное моделирование региональных экосистемных потоков CO_2 в Сибири по данным измерений со спутника ОСО-2 161

Красненко Н.П., Павлинский А.В.
Влагонасыщенность тропосферы в зимний период 2026 года в г. Томске 162

Кривенок Л.А., Гаврилов Г.О., Устинов Н.Б., Ларина А.В., Швец М.С., Никитин Д.А., Цветнова Е.А., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С.
Поглощение метана почвами южной тундры Западной Сибири: суточная и пространственная изменчивость 163

Куликов М.Ю., Чубаров А.Г., Беликович М.В., Дементьева С.О., Фейгин А.М.
Дневное фотохимическое равновесие полных концентраций семейств Ox и HOx на высотах стратосферы и мезосферы 164

Ларина А.В., Гаврилов Г.О., Казанцев В.С. **Оценка эмиссии CH_4 с поверхности хасырея (осушенной котловины термокарстового озера) по результатам полевых исследований в южной тундре Западной Сибири** 165

Лысова О.В., Матешева А.В. **Оценка воздействия автотранспортной сети Москвы на качество атмосферного воздуха в условиях изменяющегося климата** 166

Масляшова А.О., Гущина Д.Ю., Ольчев А.В. **Пространственно-временная изменчивость аномалий потоков CO_2 и CH_4 в тропических наземных экосистемах на различные типы Эль-Ниньо и Ла-Нинья** 167

Матешева А.В. **Исследование влияния дальнего переноса на тенденции риска для растительных экосистем биосферных заповедников северных территорий РФ от загрязнения атмосферы в 1981–2070 гг.** 168

Миронова И.А., Доронин Г.Г. **Отклик мезосферного озона на солнечные и геомагнитные возмущения** 169

Михайлова А.С., Власенко С.С., Михайлов Е.Ф. **Применение кластерного анализа для футпринтов углеродсодержащего аэрозоля в центральной Сибири** 170

Моложникова Е.В., Тюрнев И.Н., Шиховцев М.Ю.
Сезонная динамика и вертикальная структура атмосферного переноса промышленных выбросов в воздушный бассейн озера Байкал 171

Мордовской П.Г., Старостин Е.В.
Влияние солнечной радиации, температуры и влажности воздуха на концентрацию тропосферного озона в Центральной Якутии 172

Нахаев М.И., Габидуллина С.В., Голиков А.Д.
Оценка влияния транспортной нагрузки на загрязнение воздуха Кисловодска по результатам численного моделирования 173

Ногачева А.И., Колесников Е.А., Таскина А.А.
Идентификация источников аэрозольного загрязнения г. Москва по данным элементного состава и морфологии твердых частиц с применением факторного анализа 174

Панкратова Н.В., Васильева А.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Муравья В.О., Скороход А.И., Штабкин Ю.А., Кравчишина М.Д., Флинт М.В.
Исследование изменчивости концентрации атмосферного метана в Арктике по данным морских измерений летом 2024 г. 175

Панченко М.В., Пестунов Д.А., Домышева В.М., Иванов В.Г., Шамрин А.М.
Потоки CO_2 в системе «атмосфера-вода» в теплый период года в пелагиали оз. Байкал 176

Петров Н.А., Дебольский А.В., Мортиков Е.В., Васенев В.И., Окунева В.В.
Изучение переноса аэрозольного загрязнения в окрестностях г. Апатиты по данным измерений и вихреразрешающего моделирования 177

Рагульская М., Скобликов Н., Клиорин Н. **Турбулентная термодиффузия - механизм атмосферного переноса нуклеиновых биопримесей** 178

Ракитин В.С., Фёдорова Е.И., Кириллова Н.С., Белов А.Е., Панкратова Н.В.
Особенности использования спутниковых данных при оценке трендов и эмиссий метана 179

Ревокатова А.П., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А.
Формирование зимних эпизодов загрязнения воздуха в Москве: роль локальных и крупномасштабных атмосферных процессов 180

Рублев А.Н., Голомолзин В.В., Киселева Ю.В., Горбаренко А.В.
Определение потоков углерода в Центральной Сибири по результатам многолетнего мониторинга CO_2 на высотной мачте ZOTTO 181

Савиных В.В. **Тренды и вариации общего содержания озона над Северным Кавказом по данным измерений спектрофотометра Брюэра** 182

Сафронов А.Н. **Космическая миссия: от разработки основных принципов создания обитаемых планет до поиска разумных миров** 183

Сеник И.А., Артамонова М.С., Сеник В.А., Максименков Л.О.
Мониторинг приземного озона и аэрозоля на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА и в г. Кисловодске 184

Ситников Н.М., Колдаев А.В. **Использование беспилотных авиационных систем в гидрометеорологических наблюдениях** 185

Степанова Е.В., Горчаков Г.И., Карпов А.В. **Микроструктура летних смогов на Северной Китайской равнине в 2012-2013 гг.** 186

Татаринович Е.В., Борисов Д.В., Кузнецова И.Н. **Опыт применения моделей машинного обучения для определения НМУ** 187

Тимошенко Ф.А.
Комбинированная система мониторинга атмосферного воздуха: лабораторное и численное исследование переноса и осаждения минеральных аэрозолей 188

Тихонов С.А.
Выбросы SO_2 и CO_2 от эксплозивных извержений вулканов Курило-Камчатской дуги (2020–2025): оценка по спутниковым данным с учётом неопределённостей 189

Устинов Н.Б., Ларина А.В., Гаврилов Г.О., Казанцев В.С., Белов А.Е., Цветнова Е.А., Усачева А.А., Новикова Е.В.
Деградирующие полигональные торфяники южных тундр Западной Сибири как источники метана: ключевые факторы и (суб)региональные оценки эмиссии 190

Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Лябина В.А., Акопян С.С. **Структура и интенсивность летних осадков в Москве по данным непрерывных наблюдений** 191

Шамсутдинов Д.Р., Постыляков О.В., Боровский А.Н.
Мониторинг состава атмосферы: совместное восстановление профилей аэрозоля и диоксида азота по измерениям MAX-DOAS 192

Швец П.А., Мостаманди С.В. **Влияние химических и аэрозольных граничных условий на результаты комплексного моделирования атмосферы Каспийского региона с помощью WRF-Chem** 193

Шиховцев М.Ю., Печкур Д.Ю., Моложникова Е.В.
Систематизация температурных инверсий пограничного слоя Южного Прибайкалья и их влияния на содержание примесей в атмосфере 194

Шишкин Г.И. **Вертикальное распределение озона в тропо-стратосфере на территории Приволжского федерального округа** 195

Штабкин Ю.А., Губанова Д.П., Виноградова А.А., Кириллова Н.С., Моисеенко К.Б.
Проблемы численного моделирования пространственно-временного распределения приземной концентрации аэрозолей в Московском регионе 196

Штабкин Ю.А., Кириллова Н.С., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Васильева А.В., Пестунов Д.А., Белан Б.Д., Репина И.А., Моисеенко К.Б., Кравчишина М.Д.
Метан в западной части Евразийской Арктики в летний период 2024 года: наблюдения АМК-96 и численное моделирование 197

Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Васильева А.В., Кириллова Н.С., Пестунов Д.А., Белан Б.Д., Кравчишина М.Д.
Атмосферное содержание и потоки метана в западной части Евразийской Арктики поздней осенью 2023 года: судовые наблюдения и численное моделирование 198

Секция V. Физика пограничных слоев

Балдандоржина А.Б., Согачев А.Ф., Репина И.А., Люлюкин В.С. **Предварительный анализ эволюции пограничного слоя атмосферы над неоднородной подстилающей поверхностью по данным комплекса Звенигородской научной станции**..... 199

Барсков К.В. **Влияние пространственной неоднородности городского ландшафта на структуру масштабов атмосферной турбулентности**..... 200

Богородский П.В., Сидорова О.Ю. **Сравнение темпов роста плавучего льда при наличии и отсутствии конвекции воздуха в его снежном покрове**..... 201

Варенцов М.И., Константинов П.И., Слуковская М.В., Корнейкова М.В., Семенова А.А., Назмутдинов К.Ф.,, Васенев В.И., Бакланов А.А.
Острова тепла и концентрации PM_{10} в городах Российской Арктики по данным измерительных кампаний UHIARC и Arctic SUN 202

Виноградова А.А., Котова Е.И., Лохов А.С.
Сезонная и суточная изменчивость высоты слоя перемешивания в нижней тропосфере над прибрежными территориями севера Евразии 203

Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Климанова Е.В., Анисимов С.В.
Пространственная статистика и модальная структура горизонтальных неоднородностей электрического поля в вихреразрешающей модели приземного электродного эффекта..... 204

Гафуров И.А., Репина И.А. **Прогноз условий образования замерзающих осадков по данным профилемера МТП-5 методами машинного обучения** 205

Гибадуллин Р.Р., Ильясов Д.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В.
Оценка погрешностей одномерного представления лесного полога при расчете поглощения коротковолновой радиации 206

Гордин В.А., Ефременко Д.С. **Восстановление тензора турбулентного обмена и оптимизация нижнего граничного условия в атмосферном пограничном слое** 207

Гостев К.С., Сурков Я.А., Щелканов А.И., Xi Liu
Новый подход к прогнозированию смерчеопасности на основе стохастического дифференциального уравнения Ланжевена..... 208

Дмитриев Э.М.
Зависимость интегральных характеристик приземного электродного эффекта от турбулентного режима по данным численного моделирования 209

Зайцева Д.В., Люлюкин В.С., Кузнецов Д.Д., Каллистратова М.А. **Об изменчивости периодических субмезомасштабных структур в устойчивом атмосферном пограничном слое по данным многоточечных содарных измерений** 210

Канцырев Б.Л. **Радиационно-конвективная модель тропосферы с априорным заданием высотного распределения коэффициента турбулентного обмена** 211

Климанова Е.В., Галиченко С.В., Анисимов С.В. **Результаты анализа вариабельности приземного атмосферного электрического поля и плотности тока на основе разнесённых наблюдений** 212

Козлов Н.О., Малиновская Е.А., Калинин С.Д. **Масштабное преобразование как метод идентификации механизма переноса пылевого аэрозоля** 213

Кочин А.В. **Неопределенность высоты и радиационной температуры нижней границы облачности из-за влияния подоблачной дымки** 214

Люлюкин В.С., Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Кузнецов Д.Д. **Типизация форм волн Кельвина–Гельмгольца в устойчивом АПС по композитному анализу содарных данных** 215

Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г. **Электростатические пылевые структуры в ветро-конвективных условиях** 216

Миллер Е.А., Князев А.К., Лукьянов А.Н., Баранов Н.А., Лезина Е.А. **Точность определения высоты нижней границы температурной инверсии по данным радиометрических измерений** 217

Миронов В.Л., Миронов С.В. **Аналитическая модель распределения средней скорости ветров в атмосферном пограничном слое** 218

Новикова Е.В., Репина И.А., Мортиков Е.В. **Анализ энергетики прибрежных ветров по данным измерений и LES-моделирования** 219

Окунева В.В., Самсонов Т.Е., Варенцов М.И. **Технология автоматизированного создания растровых баз данных параметров городской среды для бесшовного метеорологического моделирования** 220

Пашкин А.Д., Репина И.А., Шестакова А.А. **Исследования энергетического баланса подстилающей поверхности архипелага Земля Франца-Иосифа по данным автономной метеорологической станции на покровном леднике в августе 2026 г.** 221

Пиваев П.Д., Кудрявцев В.Н. **Роль радиационного трения в формировании реакции океана на прохождение тропического циклона** 222

Плаксина Ю.Ю., Высоцкая Ю.К., Родыгин В.И., Пуштаев А.В., Уваров А.В. **Механизм блокировки поверхности воды малыми примесями (эксперимент и моделирование)** 223

Покровская А.И., Шангареева С.К., Степаненко В.М. **Развитие модели TerM для масштабируемой оценки потоков углерода на основе данных FLUXNET** 224

Прохорчук А.А., Галиченко С.В., Дмитриев Э.М., Анисимов С.В.
Турбулентные потоки заряда и ковариационная поправка к скорости рекомбинации лёгких ионов в приземном слое атмосферы 225

Репина И.А., Барсков К.В., Новикова Е.В., Пашкин А.Д. **Экспериментальные исследования мезомасштабных структур над неоднородной поверхностью** 226

Согачев А.Ф., Балдандоржина А.Б., Репина И.А., Люлюкин В.С.
Применимость аналитических моделей футпринта в неоднородных ландшафтах: на примере Звенигородской научной станции 227

Тихоненко Н.Д., Гинзбург А.С. **Сравнительный анализ характеристик городского острова тепла в северных и южных столицах России, Казахстана и Китая** 228

Троицкая Ю.И., Зотова А.Н., Ермакова О.С., Сергеев Д.А.
Вклад морских брызг в газообмен между океаном и атмосферой 229

Фролькис В.А., Евсиков И.А.
Оценка обусловленного отоплением антропогенного потока тепла в городах Российской Федерации с населением не менее трехсот тысяч человек 230

Юшков В.П. **Связь турбулентного потока импульса и потока тепла в атмосферном пограничном слое при устойчивой стратификации** 231

Юшков В.П. **Адиабатические флуктуации в конвективном пограничном слое** 232

Секция VI. Распространение и взаимодействие волн в атмосфере

Горбунов М.Е. **Нейронно-сетевые методы в обработке радиозатменных данных** ... 233

Горбунов М.Е., Шмаков А.В., Киселева Ю.В.
Использование данных радиозатменного зондирования для оценки сплоченности арктического ледяного покрова 234

Закиров М.Н., Чуличков А.И., Куличков С.Н.
Оценка формы и характеристик повторных акустических приходов в атмосфере с помощью слепой деконволюции 235

Захаров В.И., Чэнь Чуаньфу **Исследования мезомасштабных волн в ионосфере по данным миссий Swarm и CSES** 236

Идрисов А.Ф., Чуличков А.И., Куличков С.Н.
Оценка адекватности морфологических методов анализа формы временных рядов в задачах дистанционного зондирования Земли и атмосферы 237

Креузов А.С., Куличков С.Н., Попов О.Е., Зайцева Д.В., Люлюкин В.С., Кузнецов Д.Д.
Применение сети микробарографов для анализа когерентных возмущений в устойчиво стратифицированном АПС 238

Кшевецкий С.П., Курдяева Ю.А., Гаврилов Н.М., Куличков С.Н. **Негладкие решения уравнений гравитационной гидродинамики и тонко-слоистые структуры**..... 239

Малкина О.Е., Малкин Е.И., Чернева Н.В. **Метод местоопределения гроз по данным однопунктового ОНЧ-пеленгатора**..... 240

Медведева И.В., Ратовский К.Г. **Эффекты внезапных стратосферных потеплений в верхней атмосфере над Восточной Сибирью**..... 241

Стариченко Е.Д., Медведев А.С., Беляев Д.А., Фёдорова А.А., Кораблев О.И., Трохимовский А.Ю. **Внутренние гравитационные волны и их активность в атмосфере Марса по данным эксперимента по солнечному просвечиванию ACS с борта аппарата ExoMars/TGO**..... 242

Степанов Р.А. **Восстановление интенсивности меридиональных пульсаций по средним полям в модельной атмосфере с помощью нейронной сети**..... 243

Топтунова О.Н., Коваль А.В., Моцаков М.А., Диденко К.А. **Раннее внезапное стратосферное потепление ноября 2025 г.: тропосферные предвестники и динамическое взаимодействие слоёв атмосферы**..... 244

Специальная секция «Экстремальные погодно-климатические явления, связанные с ними последствия и риски в условиях быстрых изменений климата в Арктике»

Акперов М.Г., Антипина У.И., Семенов В.А., Елисеев А.В. **Климатология вертикальной структуры внетропических циклонов Северного полушария по данным реанализа ERA5**..... 245

Ангудович Я.И. **Изменчивость уровня океана в Северной Атлантике и его связь с климатическими параметрами Баренцева моря**..... 246

Антипина У.И., Акперов М.Г., Семенов В.А., Елисеев А.В. **Пространственно-временная изменчивость циклонов и антициклонов во внетропических широтах в 1979–2015 гг.**..... 247

Бабанов Б.А., Семенов В.А. **Погодные режимы Евро-Атлантики и Северной Евразии в моделях CMIP6: сопоставление с реанализом ERA5**..... 248

Бетке И.А., Акперов М.Г., Подчезерцева С.Б., Мысленков С.А., Шестакова А.А. **Вклад атмосферных процессов разных временных масштабов в формирование ветрового волнения в Европейском секторе Арктики**..... 249

Братцева А.Л. **Изменения повторяемости экстремальных осадков 1979-2023 гг. в полярных областях ДВФО по данным архива CPC и станционных наблюдений**..... 250

Васильева А.В., Моисеенко К.Б., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Сафронов А.Н., Скороход А.И. **Оценки эмиссионных коэффициентов для CO_2, CO, CH_4 и NO**

в зависимости от типа леса по измерениям состава воздуха в шлейфах пожаров в тайге в Сибири 251

Воронцова В.С., Алешина М.А., Семенов В.А. **Вклад факторов внешнего воздействия на климат в изменение летних осадков на юге ЕТР** 252

Гибадуллина А.И., Леонов И.И., Соколихина Н.Н., Кислов А.В.
Замерзающие осадки и обледенение судов в Арктической зоне России в условиях глобального потепления 253

Грицун А.С., Тарасевич М.А., Брагина В.В.
Качество прогнозирования на сезон-год в линейке моделей INM-CM 254

Дубинина А.В. **Связь январской концентрации морского льда Баренцева моря с предшествующими значениями индекса Северо-Атлантического колебания: прогностическая оценка** 255

Ежкова А.А., Брагина В.В., Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г.
Влияние схемы адвективного переноса морского льда на воспроизведение современного климата Арктики в модели Земной системы ARTS-ESM-M 256

Королёв Г.Г., Константинов П.И.
Климатическая адаптация городов миллионеров РФ: ранжирование по жаре, термическому комфорту и другим опасностям 257

Латонин М.М., Семенов В.А., Бабанов Б.А., Акперов М.Г., Ван Л.
Связь Баренцева колебания со структурой «тёплая Арктика–холодная Евразия» в различные сезоны 258

Марчукова О.В., Пигарёва А.Е., Миляев И.А. **Зональные различия предсказуемости ландшафтных пожаров Ямало-Ненецкого автономного округа** 259

Назмутдинов К.Ф., Варенцов М.И., Чернокульский А.В., Аварский А.К., Васенев В.И.
Моделирование динамики городского острова тепла в Норильске на основе сценарных прогнозов климата методами машинного обучения 260

Нахаев М.И., Семенов В.А., Чернокульский А.В., Беликов И.Б., Белоусов В.А., Артамонов А.Ю. **Аномально высокие концентрации приземного озона в Кисловодске в 2025 г.** 261

Никитенко-Валиахметов М.Р., Гавриков А.В., Кошкина В.С.
Типизация полярных мезоциклонов в данных численного моделирования с применением методов машинного обучения 262

Петриченко С.А., Калмыкова О.В., Козлов С.В., Дмитриев М.С., Кулижникова Л.К.
Усовершенствованный блок построения прогнозов возможного возникновения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России 263

Поповичева О.Б., Чичаева М.А., Ковач Р.Г., Марков Е.А., Слободян В.Ю., Касимов Н.С.
Экстремальные явления аномального роста черного углерода

в периоды Арктической дымки и сибирских пожаров, по многолетним данным в Российской Арктике 264

Романенко В.А., Семенов В.А., Латонин М.М. **События ледовых перекрытий Севморпути в период летней навигации 2000 – 2025 гг.** 265

Серых И.В., Трусенкова О.О., Скакун А.А.
Повышение температуры восточной части российской Арктики по данным наблюдений и результатам моделей CMIP6 в 1940–2099 годы 266

Смирнов М.А., Хан В.М., Борисов Д.В.
Нейросетевое моделирование снежного покрова с использованием сезонных прогнозов по модели INMCM6M 267

Сумерова К.А., Куликова И.А., Хан В.М. **Оценка связи Сибирского антициклона с крупномасштабными циркуляционными процессами для уточнения сезонных прогнозов** 268

Терехов М.И., Чернокульский А.В., Нахаев М.И. **Долгопериодная изменчивость метеорологических условий, способствующих накоплению примесей в приземном слое атмосферы в Северной Евразии** 269

Шестакова А.А., Прохорова У.В., Терехов А.В., Елагина Н.Э., Ромашова К.В., Василевич И.И. **Влияние фёнов на тепловой баланс и таяние ледников залива Грёнфьорд (Шпицберген)** 270

Яровая Д.А. **Влияние морского льда на эволюцию полярного мезоциклона (на примере случая 15–16 марта 2021 г. над Баренцевым морем)** 271