

Российская академия наук
Геофизическая обсерватория «Борок» –
филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Институт прикладной физики
Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова

СОСТАВ АТМОСФЕРЫ АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

XXI Всероссийская школа-конференция
молодых ученых

Борок
6 – 10 июня 2017 г.

Тезисы докладов

Ярославль
2017

УДК 621.3.01(063)

ББК 31.211я431

С 66

С 66 **Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы.** Тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль : Филигрань, 2017. – 90 с.

ISBN 978-5-906682-85-7

Ответственный редактор:
д.ф.-м.н. *С.В. Анисимов*

В сборнике представлены тезисы докладов XXI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Для ученых, работающих в области химии и физики атмосферы, атмосферного электричества, моделирования климата и смежных областях, преподавателей и студентов вузов.

УДК 621.3.01(063)

ББК 31.211я431

ISBN 978-5-906682-85-7

© ГО «Борок» ИФЗ РАН макет,
оформление, верстка, 2017

© Коллектив авторов, текст, 2017

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Анисимов С.В. – д.ф.-м.н., Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок (председатель);
2. Еланский Н.Ф. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м. н., Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва (сопредседатель);
3. Фейгин А.М. – д.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород (сопредседатель);
4. Мохов И.И. – академик, профессор, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва;
5. Мареев Е.А. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород;
6. Тихоцкий С.А. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва;
7. Катцов В.М. – д.ф.-м.н., Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург;
8. Жмур В.В. – профессор, д.ф.-м.н., Московский физико-технический институт, Москва;
9. Соломина О.Н. – член-корреспондент РАН, д.г.н., Институт географии РАН, Москва;
10. Володин Е.М. – д.ф.-м.н., Институт вычислительной математики РАН, Москва;
11. Грицун А.С. – д.ф.-м.н., Институт вычислительной математики РАН, Москва;
12. Тимофеев Ю.М. – д.ф.-м.н., физический факультет СПбГУ, Санкт-Петербург;
13. Чубарова Н.Е. – д.г.н., географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Двадцать первая всероссийская школа-конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (САтЭП-2017) организована Геофизической обсерваторией «Борок» – филиалом Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН при участии Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Института прикладной физики РАН. Школа-конференция проводится с 6 по 10 июня 2017 г. в поселке Борок Ярославской области.

Школа-конференция имеет целью развитие творческих научных связей поколений российских ученых, являясь органическим продолжением Всероссийских конференций молодых ученых «Атмосферный озон» (1995–1997 гг.), «Малые примеси в атмосфере» (1998–1999 гг.), «Малые примеси атмосферы и атмосферное электричество» (2000–2003 гг.), «Состав атмосферы и электрические процессы» (2004–2005 гг.), «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (2006–2016 гг.). Постоянное расширение тематики конференций обусловлено сложным характером атмосферных процессов, их взаимосвязью и взаимодействием. Объединение в рамках проведенных конференций направлений изучения газовых составляющих атмосферы, атмосферного аэрозоля и электричества атмосферы, моделирования климата и формирования глобальной электрической цепи стало стимулом дальнейшей координации научных исследований и способствовало получению новых научных результатов в динамично развивающихся областях современной физики атмосферы.

Программа САтЭП-2017 включает четыре секции:

1. Наблюдения малых газовых примесей и электрических полей в атмосфере. Анализ и интерпретация данных.
2. Моделирование климатической системы.
3. Диагностика и моделирование физико-химических процессов в атмосфере.
4. Генерация электрических полей в атмосфере. Глобальная электрическая цепь.

В рамках каждой из секций наряду с докладами молодых (до 35 лет) исследователей представлены лекции ведущих российских ученых о последних достижениях в различных областях физики атмосферы.

С.В. Анисимов
Н.Ф. Еланский
А.М. Фейгин

**НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ.
АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ**

Элементарные химические процессы атмосферной химии

И. И. Морозов, Е. С. Васильев, Г. В. Карпов

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва

Моделирование атмосферных процессов в лабораторных условиях требует применения современных физико-химических методов. Данные полученные в экспериментах совершенно необходимы для построения моделей климата. В настоящее время во многих странах ведётся интенсивная работа по проблеме связывания оксида углерода, выбрасываемого в атмосферу промышленностью. Эти работы основаны на связывании CO_2 с помощью аминов. В предлагаемой лекции будет уделено внимание этому вопросу, а также новейшим методам исследования [1–4].

Применяя метод лазерного фотолиза, были определены константы скорости реакции анионов монохлоруксусной кислоты с гидроксильным радикалом в воде в широком температурном интервале. Впервые в мире. Были определены энергия активации реакции, энтропия, энтальпия и свободная энергия Гиббса. Полученные результаты позволили оценить время жизни кислот в воде. Показано, что для раствора монохлоруксусной кислоты при значениях $\text{pH} = 5$ доля анионов достигает величины 0.99270842, а при понижении величины pH до 0.6 доля анионов снижается до 0.00539079. Поэтому их реакции в воде и соответственно времена жизни будут существенно различаться. Это особенно важно для понимания процессов, протекающих в аэрозолях атмосферы.

С помощью масс-спектрографического метода электрораспыления растворов электролитов в вакууме определены величины энтальпии ΔH для гидратации ионов брома в водном растворе. Обнаружено, что при присоединении к ионам брома первых трех молекул воды выполняется уравнение Вант-Гоффа, которое перестаёт выполняться при присоединении четвёртой молекулы воды. Величина ΔH уменьшается при увеличении числа молекул воды в гидратной оболочке. Показано, что гидратированные ионы брома, содержащие одну и две молекулы воды, наиболее интенсивны в масс-спектрах водных растворов NaBr .

Возрастающее значение аминов в атмосферной химии связано с их использованием в технологии **связывания двуоксида углерода** на промышленных предприятиях. Недавно была установлена их ключевая роль в образовании аэрозолей: даже малые примеси ди- или три-метиламина настолько увеличивают скорость образования центров нуклеации с серной кислотой, что они одни могут быть ответственными за образование аэрозольных частиц в атмосфере [5]. Время жизни метиламинов в атмосфере определяют их реакции с радикалами OH , конкурирующие с вымыванием и осаждением аминов. Знание механизма реакций OH с аминами необходимо для моделирования и предсказания состава атмосферы.

Литература

1. *Строкова Н. Е., Савилов С. В., Морозов И. И., Ягодковская Т. В., Лунин В. В.* Лабораторное моделирование взаимодействия озона с хлоруксусными кислотами в условиях, приближенных к стратосферным // *Ж. физ. хим.* 2015. Т. 89. № 1. С. 33–42.
2. *Vasiliev E. S., Knyazev V. D., Karpov G. V., Morozov I. I.* Kinetics and Mechanism of the Reaction of Fluorine Atoms with Pentafluoropropionic Acid // *J. Phys. Chem. A.* 2014. V. 118. P. 4013–4018.
3. *Karpov G. V., Vasiliev E. S., Morozov I. I., Savilov S. V., Strokov N. E., Lunin V. V.* Hydration of Bromine Ions in Water // *Int. J. Chem. Kin.* 2016. V. 48. P. 442–448.
4. *Butkovskaya N. I., Setser D. W.* Branching Ratios and Vibrational Distributions in Water-Forming Reactions of OH and OD Radicals with Methylamines // *J. Phys. Chem. A.* 2016. V. 120. P. 6698–6711.
5. *Almeida et al.* Molecular understanding of sulphuric acid–amine particle nucleation in the atmosphere // *Nature.* 2013. V. 502. P. 359–363.

Долгосрочный прогноз типов весен для Саратовской области

М. А. Алимтиева

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов

Изучению центров действия атмосферы (ЦДА) как структурных элементов общей циркуляции атмосферы посвящено огромное число публикаций. Классические работы по изучению ЦДА выполнены Б. П. Мультиановским, А. А. Гирсом, Б. Л. Дзердзеевским, М. Х. Байдалом, Н. П. Смирновым, В. И. Воробьевым, С. Ю. Качановым. В работах этих авторов было показано, что центры действия атмосферы не только формируют существенные региональные климатические особенности, но и обнаруживают дальние синхронные и асинхронные связи с крупномасштабными территориальными аномалиями погоды.

В настоящей работе поставлена задача исследовать прогностические возможности центров действия атмосферы для долгосрочного прогноза типа весны для Саратовской области.

Рабочим приемом в построении расчетной схемы прогноза выбрана модель дискриминантного анализа с использованием канонических корреляций [1]. Применение дискриминантной модели в прогностических целях проводится давно и вполне успешно, однако ее применение ограничивалось разделением двух групп явлений [2, 3]. В нашем случае возникает необходимость в разделении трех групп явлений — ранней, поздней и нормальной весны. При каждом типе весны весенне-полевые работы имеют свою специфику.

На первом этапе составления прогноза проводится разделение типов весен. В настоящей разработке ключевой выбрана дата перехода через 10°C , так как именно с этой датой связаны важнейшее для коммунальных служб явление — окончание отопительного сезона. На временном интервале с 1971 по 2010 г. выделено 13 поздних, 13 нормальных и 15 ранних типов весен.

С помощью пакета программ «STATISTICA» была проведена серия статистических экспериментов по разделению типов весен в зависимости от характеристик трех ЦДА — Исландского минимума, Азорского максимума и зимнего Азиатского антициклона. В качестве потенциальных предикторов использовались абсолютные отклонения от среднемесячных значений широты, долготы, давления в центре выбранных ЦДА для месяцев с сентября по январь. Такой временной интервал выбора предикторов обеспечивает двухмесячную заблаговременность прогноза.

Расчеты проводились с пошаговым исключением предикторов, в результате чего отобраны 11 наиболее информативных, которые были включены в расчетную схему. Рассчитав весовые коэффициенты для каждого предиктора, определены корни уравнений линейных дискриминантных функций (ЛДФ).

На рисунке представлена визуализация дискриминантной модели разделения типов весен (ретроспективный прогноз). Коэффициент дискриминации равен 0,136, что свидетельствует о неплохом разделении: в область нормальных весен попала одна поздняя, в область поздних — три нормальные и одна ранняя, в область ранних — одна нормальная и одна поздняя.

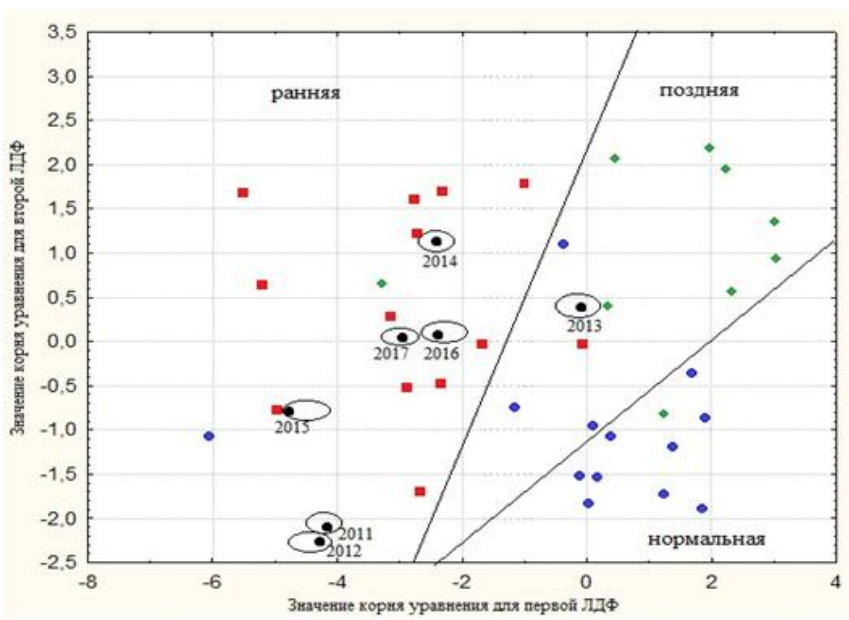


Рис. Кластеризация типов весен с двухмесячной заблаговременностью. Квадраты – ранняя весна, кружки – нормальная весна, ромбы – поздняя весна.

По полученной модели определены значения ЛДФ для прогноза типов весен лет, не участвовавших в построении расчетной схемы (перспектива). Сравнение результатов перспективных прогнозов (2011–2017 гг.) показало, что в трех случаях из шести прогноз типа весны оказался правильным. В настоящее время рассчитаны значения ЛДФ для прогноза типа весны в 2017 году. Весна в 2017 году ожидается ранней.

Литература

1. Халафян А. А. Учебник STATISTICA 6. Статистический анализ данных / М.: Бинوم, 2007. – 199 С.
2. Байдал М. Х., Неушкин А.И. Макроциркуляционные факторы и прогноз засух в основных сельскохозяйственных районах страны // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 1979. Вып. 59. – 140 с.
3. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии / Л.: Гидрометеиздат. 1967. – 242 С.

Вариабельность электрической проводимости приземной атмосферы средних широт

К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, С. В. Галиченко
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

В ходе длительных полевых натуральных наблюдений исследовано состояние электричества атмосферного пограничного слоя [1]. Полевые натурные наблюдения проводились на полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E] и на берегу реки Ильд близ села Верхне-Никульское Некоузского района Ярославской области [58°01' N; 38°14' E]. Цель работы — изучение процессов формирования электрической проводимости приземной атмосферы.

По результатам наблюдений, суточный ход электропроводности приземного слоя атмосферы коррелирует с суточным ходом объемной активности (ОА) радона [1]. Состояние подстилающей поверхности и ее тип влияют на изменение ОА радона и электрической проводимости атмосферного приземного слоя. В ночное время ОА радона и электрическая проводимость максимальны, минимум наблюдается в дневное время [2, 3]. Горизонтальный перенос радона формирует длиннопериодные вариации электропроводности приземного воздуха.

Спектр короткопериодных пульсаций электропроводности воздуха содержит гармоники с периодами 40 и 20 минут в утренние часы. Спектр пульсаций плотности объемного электрического заряда, сосредоточенного на легких аэроионах, самоподобен с показателем наклона близким к $-5/3$ [4]. Впервые обнаружены когерентные аэроэлектрические структуры плотности объемного электрического заряда [4].

Таким образом, по результатам натуральных наблюдений в формирование суточной вариации электрической проводимости приземной атмосферы выявлен вклад объемной активности радона; показано, что короткопериодные пульсации электрической проводимости и плотности объемного электрического заряда возникают из-за конвекции и турбулентного переноса аэроионов в приземной атмосфере. В ходе исследований разработано измерительное оборудование, содержащее ряд оригинальных технических решений [5].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 16-17-10209).

Литература

1. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В. Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 4. С. 445–454.

2. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В.* Транспорт радона и формирование электрического состояния атмосферного пограничного слоя // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9. № 4. С. 1–8.
3. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А.П., Шихова Н. М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 1–16.
4. *Анисимов С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В.* Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // *Изв. Вузов, Радиофизика*. 2013. Т. 56. № 11–12. С. 787–802.
5. *Анисимов С. В., Афиногенов К. В., Гурьев А. В.* Аппаратная платформа аэростатных аэроэлектрических наблюдений // *Научное приборостроение*. 2017. Т. 27. № 1. С. 21–24.

Наблюдения аэроэлектричества на геофизической обсерватории «Борок»

К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, Э. М. Дмитриев, А. В. Гурьев
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

В докладе представлен обзор аэроэлектрических и аэрофизических наблюдений, проводимых на измерительном полигоне Геофизической обсерватории «Борок» — филиала Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ГО «Борок» ИФЗ РАН) как в непрерывном обсерваторском режиме [1], так и в ходе полевых весенне-осенних измерительных кампаний [2, 3].

Описаны приборы и методы измерений параметров атмосферы, непосредственно связанных с электрическими процессами (аэроэлектрического поля, плотности электрического тока атмосферы, концентраций аэроионов, концентраций аэрозольных частиц, объемной активности радона), а также сопутствующих аэрофизических параметров (высотные профили скорости ветра и температуры, плотность потока солнечного излучения). Результаты обсерваторских наблюдений пополняют базу данных ГО «Борок» ИФЗ РАН [4], доступ к которой обеспечивается через информационный ресурс по направлению глобальной электрической цепи, аэроэлектричества и геомагнетизма (<http://geodata.borok.ru>).

Наблюдения на ГО «Борок» ИФЗ РАН [58° 04' N; 38° 14' E] ведутся при низком уровне индустриального загрязнения и техногенного электромагнитного шума, отражая состояние природных геофизических полей. Данные наблюдений служат основой проводимых в ГО «Борок» ИФЗ РАН исследований электричества нижней атмосферы [5, 6].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 15-05-04960, 16-07-01242).

Литература

1. Анисимов С. В., Дмитриев Э. М., Афиногенов К. В., Гурьев А. В. Аэроэлектрические и аэрофизические наблюдения на геофизической обсерватории «Борок» // Материалы 2-й Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок 5 – 9 октября 2015 / ГО «Борок» ИФЗ РАН, Ярославль. 2015. С. 98–99.
2. Анисимов С. В., Афиногенов К. В., Галиченко С. В. Натурные наблюдения электричества приземной атмосферы // Материалы 17-й Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», Москва, 26 – 28 сентября, Борок 30 сентября 2016 / ИГЕМ РАН, М. 2016. С. 33–34.
3. Анисимов С. В., Афиногенов К. В., Гурьев А. В. Аппаратная платформа аэростатных аэроэлектрических наблюдений // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 1. С. 21–24.
4. Анисимов С. В., Афиногенов К. В., Гурьев А. В., Дмитриев Э. М., Прохорчук А. А. База данных Геофизической обсерватории «Борок» для аэроэлектрических ис-

следований // Материалы Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок 28 октября – 01 ноября 2013 / ГО «Борок» ИФЗ РАН. Ярославль. 2013. С. 82–83.

5. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В.* Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 4. С. 445–454.
6. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017. № 1. С. 1–16.

Экспедиционные исследования характеристик ионизации приземного слоя и содержания радона-222 в почве и атмосфере

Е. В. Егоров, С. А. Маслов, Н. А. Петров
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Оценка роли радона-222 в формировании электрического климата территорий представляется немаловажной. Период полураспада этого изотопа 3,85 суток, что позволяет этому радиоактивному газу достаточно долго находиться в атмосфере, обеспечивая ее ионизацию. Радон-222 и продукты его распада α -радиоактивны, что обуславливает их высокую ионизирующую способность [1]. В случае эманирования почвы вблизи земной поверхности образуются значительные градиенты электропроводности атмосферы, что способствует формированию слоёв объёмного заряда и изменению вертикального профиля и величины приземного электрического поля.

По результатам экспедиционных измерений [2], проведенных лабораторией геофизических исследований в 80–90-е годы прошлого века в Прибайкалье (пос. Большие Коты), средние за период наблюдений профили полярных удельных электропроводностей воздуха в слое 0–5 метров не обнаруживают заметного увеличения значений электропроводности по мере приближения к земной поверхности, что указывает на слабое эманирование почвы. Оценить содержание радона в почве и атмосфере в тот период наблюдений не было возможности. В июне 2015 года в пос. Большие Коты на измерительной площадке предыдущих экспедиций посредством радонмонитора «AlphaGUARD PQ2000 PRO» с внешними устройствами: датчиком почвенного газа «AlphaGUARD Soil GasUnit» и газовым электронным насосом «AlphaPUMP», измерена объёмная активность радона-222 в почвенном газе и атмосфере. В почве на глубине 10 см на измерительной площадке она составила порядка 5000 Бк/м^3 , а на такой же глубине в 100 м от площадки вблизи береговой линии — более $40\,000 \text{ Бк/м}^3$. В то же время в воздухе концентрация радона невелика и в среднем за 37 часов измерений составила $18 \pm 11 \text{ Бк/м}^3$. По-видимому, как и предполагалось, близость грунтовых вод и состояние верхнего слоя почвы определяют слабое поступление радона-222 в атмосферу при высоком содержании его в грунте. Естественный глинистый экран, судя по измерениям, задерживает поступление радона в атмосферу на территории Цимлянской научной станции, где в 2014–2015 гг. проводились совместные экспедиционные исследования ИФА им. А. М. Обухова РАН и ЮФУ. Совместный анализ этих данных с ранее полученными результатами измерений в пунктах Кашарского района Ростовской области, где обнаружено значительное поступление радона-222 из почвы в атмосферу, подтверждает ранее сделанный вывод о тесной связи

градиента электропроводности вблизи земной поверхности с эманацией почв [3]. Обсуждаются особенности профилей электропроводности в зависимости от условий выхода радона-222 из почвы в атмосферу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант 16-05-00930 А.

Литература

1. *Брикар Дж.* Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества // Проблемы электричества атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. С. 68–105.
2. *Петров А. И., Петрова Г. Г.* Результаты измерений электропроводности в электродном слое атмосферы // Труды ГГО. 1990. Вып. 527. С. 12–17.
3. *Petrov A. I., Petrova G. G., Panchishkina I. N.* Profiles of polar conductivities and of radon-222 concentration in the atmosphere by stable and labile stratification of surface layer // Atmospheric Research. 2009. V. 91. P. 206–214.

Объемная активность изотопов радона и статистические параметры приземной турбулентности: влияние кучевой облачности

А.С. Козьмина, С.В. Галиченко, С.В. Анисимов
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Развитие модели ионизации нижней атмосферы предполагает выполнение оценок влияния облачности на вариабельность высотных профилей объемной активности изотопов радона [1]. Результаты недавно проведенных исследований вертикального распределения радона ^{222}Rn в атмосфере показали наличие устойчивой связи температурной стратификации атмосферы и наличия облачности с типом формируемого высотного профиля объемной активности радона [2]. Как было установлено в [3], кучевая облачность, создавая неоднородные возмущения турбулентного потока тепла с земной поверхности, оказывает влияние на динамику атмосферного пограничного слоя, турбулентные масштабы, статистику и скорость диссипации кинетической турбулентной энергии.

В докладе представлены результаты обработки наземных натуральных наблюдений объемной активности радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) совместно с дисперсией вертикальных турбулентных пульсаций скорости ветра, скоростью диссипации турбулентной кинетической энергии, вертикальным турбулентным потоком тепла, динамической скоростью трения при наличии и отсутствии кучевых облаков «хорошей погоды».

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

Литература

1. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017. № 1. С. 155–170.
2. Williams A. G., Zahorowski W., Chambers S., Griffiths A., Hacker J. M., Element A., Werczynsky S. The vertical distribution of radon in clear and cloudy daytime terrestrial boundary layers // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 26. № 6. P. 500–520.
3. Horn G. L., Ouwersloot H. G., Vilà-Guerau de Arellano J., Sikma M. Cloud shading effects on characteristic boundary-layer length scales // Boundary Layer Meteorol. 2015. V. 157. P. 237–263.

Временная изменчивость концентрации бериллия-7 (^7Be) в атмосфере г. Севастополь за период 2011–2016 гг.

Д. А. Кременчуцкий, Г. Ф. Батраков

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

Бериллий-7 (^7Be) — короткоживущий радионуклид космогенного происхождения, который образуется в атмосфере. Научный интерес к ^7Be обусловлен возможностью использования его в качестве трассера различных процессов в атмосфере. Временная изменчивость содержания ^7Be в приземной атмосфере носит региональный характер. Цель работы — исследовать временную изменчивость концентрации ^7Be в приземной атмосфере г. Севастополь за период с 2011–2016 гг. и оценить влияние на нее различных факторов.

За период с июля 2011 г. по декабрь 2016 г. было отобрано 1260 проб атмосферных аэрозолей. Статистический анализ данных наблюдений показал, что концентрация ^7Be в атмосфере изменялась в интервале от 0,2 до 10,2 мБк/м³, средняя величина 3,4 мБк/м³. Распределение величины концентрации ^7Be одновершинное, но отличное от нормального. Коэффициент вариации равен 46,6. Из спектрального анализа результатов мониторинга следует, что имеет место наличие периодичности с частотой 1 год с уровнем достоверности 99%. Наблюдается уменьшение среднегодовой величины концентрации ^7Be с 4,1 Бк/м³ до 2,7 Бк/м³ в период 2011–2015 гг., а в 2016 г. имел место рост концентрации до 3,5 Бк/м³. В течение года среднемесячные величины концентрации ^7Be изменяются в интервале от 2,2 до 4,5 Бк/м³. Концентрация ^7Be увеличивается в течение весенне-летнего периода, с максимумом концентрации в период с мая по август, и уменьшается в течение осенне-зимнего периода, с минимумом концентрации в период с декабря по январь.

Проведена декомпозиция трендов [1], в результате которой временная изменчивость концентрации ^7Be была представлена в виде суперпозиции трех компонент: трендовая, сезонная и нерегулярная. Рассмотрена связь между изменением концентрации ^7Be (общей и полученных компонент) и солнечной активности, а также метеопараметрами. Наблюдается статистически значимая связь между среднемесячной величиной концентрации ^7Be в атмосфере (а также ее сезонной компоненты) и величиной температуры, скорости ветра и количеством выпадающих осадков.

Литература

1. *Findley D. F., Monsell B. C., Bell W. R., Otto M. C., Chen B.-C.* New Capabilities and Methods of the X-12-ARIMA Seasonal-Adjustment Program // *Journal of Business & Economic Statistics*. 1998. V. 16, № 2. P. 127–152.

Исследование рентгеновского излучения, возникающего в экспериментах с длинными искрами

Ф. А. Кутерин, Ю. В. Шлюгаев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

После обнаружения рентгеновского и гамма излучения, сопутствующего грозovým разрядам [1, 2], были проведены успешные эксперименты по обнаружению рентгеновского излучения в экспериментах с длинными искрами [3, 4]. В докладе будут представлены результаты регистрации рентгеновского излучения от искровых разрядов, полученных с использованием высоковольтного генератора, расположенного на полигоне Всероссийского электротехнического института в г. Истра Московской области, в 2014–2016 годах. Высоковольтный импульсный генератор, выполненный по схеме генератора Маркса создавался для изучения процессов, происходящих в линиях электропередачи при попадании в них молниевых разряда, и имеет параметры импульсов, отличающиеся от тех, что использовались в работах [3, 4], в первую очередь, бóльшим временем нарастания напряжения, составляющим 100 мкс и бóльшей длительностью импульса. В то же время, амплитуда импульса высокого напряжения, которая может достигать 3 МВ, позволяет перекрывать разрядные промежутки типа «стержень-плоскость» длиной до 10–15 м, в зависимости от полярности. Увеличение длины разрядного промежутка приводит к формированию нескольких ступеней лидера, что может привести к формированию нескольких рентгеновских импульсов, разделенных заметными промежутками времени, что и предполагалось обнаружить в наших экспериментах.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ №14.В25.31.0023.

Литература

1. *Dwyer J. R.* Implications of x-ray emission from lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 12. L12102.
2. *Gurevich A. V., Chubenko A. P., Karashtin A. N., Mitko G. G., Naumov A. S., Ptiitsyn M. O., Ryabov V. A., Shepetov A. L., Shlyugaev Yu. V., Vildanova L. I., Zybin K. P.* Gamma-ray emission from thunderstorm discharges // *Physics Letters A.* 2011. V. 375. № 15. P. 1619–1625.
3. *Nguyen C. V., van Deursen A. P. J., Elbert U. M.* Multiple x-ray bursts from long discharges in air // *J. Phys. D.* 2008. V. 41. № 23. 234012 (7 P.).
4. *Agafonov A. V., Oginov A. V., Shpakov K. V.* Prebreakdown Phase in Atmospheric Discharges // *Physics of Particles and Nuclei Letters.* 2012. V. 9. № 4–5, P. 380–383.

Критерии степени развития опасных конвективных явлений

О. Е. Нечепуренко, В. П. Горбатенко
Томский государственный университет, Томск

Опасные конвективные явления, к которым традиционно относят грозы, сильный ливень, град, шквал, являются одними из трудно прогнозируемых стихий. В работах, посвященных разработке подхода пространственного обнаружения грозových кластеров по данным дистанционного зондирования Земли [1, 2] было отмечено, что значения индексов неустойчивости при грозах в разных регионах имеют различия [3]. Поскольку пользоваться зарубежными критическими значениями индексов для нашего региона не представляется возможным ввиду расхождения в термодинамических факторах и физико-географических условиях [4], необходимо определить пороговые значения индексов неустойчивости для оценки вероятности развития гроз над Сибирью.

Факт наличия опасных конвективных явлений погоды, таких как гроза и град послужил в качестве информации о степени развития конвекции. Данные о времени образования и локализации вышеуказанных явлений за теплый период (март–сентябрь) с 1990 по 2015 гг. были получены с сети метеорологических станций. Станции были выбраны с таким учетом, чтобы в радиусе 100 км проводились аэрологические наблюдения.

Были рассчитаны значения термодинамических характеристик атмосферы, полученные по данным аэрологического зондирования в сроки 00 и 12 часов всемирного скоординированного времени за те дни, когда на метеостанциях регистрировались опасные конвективные явления. В таблице приведены пороги индексов неустойчивости, начиная с которых появляется вероятность развития той или иной формы конвекции над рядом пунктов Западной и Восточной Сибири.

Литература

1. Горбатенко В. П., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю., Нечепуренко О. Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.
2. Горбатенко В. П., Нечепуренко О. Е., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектро радиометра MODIS/Terra данными аэрологического зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 07. С. 603–607.
3. Ершова Т. В., Горбатенко В. П., Клипова О. А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2012. № 122. вып. 7. С. 9–13.

4. Горбатенко В. П., Константинова Д. А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. № 12. Т. 22. С. 17–21.

Вероятностные пороги индексов неустойчивости атмосферы,
при которых развиваются грозы

Пункт		Индекс неустойчивости					
		SHOW	LIFT	SWEAT	KIND	TOTL	CAPE
Кызыл	50%	< 2	< 1,5	> 120	> 30	> 48	–
	70%	< 1,5	< 0,5	> 140	> 32	> 49,5	–
	90%	< 0	< –1	> 180	> 35	> 51,5	> 800
Барабинск	50%	< 1,5	< 0	> 170	> 32	> 49	> 250
	70%	< 0,5	< –1,5	> 200	> 33,5	> 50,5	> 350
	90%	< –2	< –3,5	> 270	> 35	> 53,5	> 1000
Барнаул	50%	< 3	< 2,5	> 140	> 28	> 47,5	–
	70%	< 1,5	< 1	> 170	> 30,5	> 49,5	> 400
	90%	< 0,5	< –2,5	> 220	> 34	> 52	> 900
Абакан	50%	< 2,5	< 0	> 165	> 32	> 49	> 400
	70%	< 0,5	< –1	> 175	> 34,5	> 51,5	> 600
	90%	< –0,5	< –2,5	> 260	> 37	> 54	> 1000
Емельяново	50%	< 2	< 0,5	> 160	> 31	> 49	> 200
	70%	< 1	< –1	> 190	> 33	> 51	> 500
	90%	< –1	< –3	> 250	> 36	> 53	> 1300
Енисейск	50%	< 2	< 0,5	> 170	> 31	> 50	> 400
	70%	< 1,5	< –1	> 200	> 33	> 51,5	> 800
	90%	< –3,5	< –3,5	> 280	> 37	> 54	> 1300

О самолетных измерениях напряженности электрического поля для контроля токов ГАЭЦ

Р. Е. Торгунаков, А. А. Синькевич, Ю. П. Михайловский

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

Измерение электрических характеристик атмосферы и облаков имеет важное фундаментальное значение при исследованиях электричества хорошей погоды и баланса токов Глобальной атмосферно электрической цепи (ГАЭЦ). Использование самолетных методов является оптимальным решением для высотного зондирования электрического поля и электропроводности атмосферы в условиях хорошей погоды. Измерения этих же параметров над грозовыми облаками позволяют оценивать токи проводимости облаков в балансе ГАЭЦ. При этих измерениях предъявляются повышенные требования к точности измерения напряженности электрического поля. В предлагаемом сообщении представлена усовершенствованная методика получения коэффициентов искажения электрического поля самолетом и его собственным зарядом, основанная на физико-математическом моделировании искажений однородного поля проводящим заряженным эквипотенциальным планером. Методика проиллюстрирована на примере самолета-лаборатории Ил-14, длительное время использовавшегося в комплексных исследованиях облаков ГГО им. А. И. Воейкова. Проведенное сравнение с существовавшей методикой показало перспективность использования предлагаемой методики, особенно для вновь оборудуемых самолетов-лабораторий.

Измерение электрических полей в атмосфере с летательных аппаратов является непростой задачей. Присутствие самолета крайне сильно искажает внешнее поле. Поэтому, при измерении электрических полей с самолетов перед исследователями в первую очередь стоит задача калибровки бортовых измерителей, т. е. определения коэффициентов искажения электрического поля самолетом и его собственным зарядом.

Выходной сигнал i -го флюксметра, расположенного на самолете и реагирующего на компоненты внешнего поля и заряд летательного аппарата можно представить в виде:

$$a_i = M_{ix}e_x + M_{iy}e_y + M_{iz}e_z + M_{iQ}Q, \quad (1)$$

где e_x, e_y, e_z – компоненты измеряемого электрического поля в системе координат, связанной с самолетом; Q – собственный заряд летательного аппарата; M_i – коэффициенты формы для i -го датчика.

Для m установленных на борту летательного аппарата датчиков:

$$\mathbf{a} = \mathbf{M}\mathbf{e}, \quad (2)$$

где \mathbf{a} – вектор выходных значений полезного сигнала флюксметров; \mathbf{e} – вектор значений внешнего электрического поля и заряда летательного аппарата; \mathbf{M} – калибровочная матрица размером $m \times 4$.

Решая уравнение (2) относительно \mathbf{e} , получим:

$$\mathbf{e} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{a} = \mathbf{B} \mathbf{a},$$

где \mathbf{B} – матрица, обратная матрице \mathbf{M} .

Элементы матрицы \mathbf{B} аналогично элементам матрицы \mathbf{M} показывают взаимосвязь между векторами \mathbf{e} и \mathbf{a} .

Для определения коэффициентов в ходе данного исследования использовались компьютерные расчеты электрического поля. С помощью решателя Electrostatic Solver в программе Maxwell решается трехмерное дифференциальное уравнение Пуассона в частных производных для неизвестного электрического потенциала Φ с соответствующими граничными условиями. Результаты моделирования представляются в графическом и табличном видах. Авторами проведена работа по определению расположения электронейтралей на поверхности самолета, выработаны рекомендации по расположению датчиков на борту летательного аппарата, получены расчетные значения калибровочных коэффициентов матриц \mathbf{B} и \mathbf{M} , произведено сравнение предлагаемой методики с использовавшимися ранее методиками.

Литература

1. *Laroche P.* Airborne measurements of electrical atmospheric field produced by convective clouds // *Revue de Physique Appliquée*. Paris. 1986. V. 23. P. 809–815.
2. *Mach D. M., Koshak W. J.* General Matrix Inversion Technique for the Calibration of Electric Field Sensor Arrays on Aircraft Platforms // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2007. V. 24. P. 1576–1587.
3. *Winn W. P.* Aircraft Measurement of Electric Field: Self-Calibration // *Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union*. 1993. V. 98. P. 7351–7365.
4. *Имянитов И. М.* Электризация самолетов в облаках и осадках. — Л.: Гидрометеоиздат. 1970.
5. *Михайловский Ю. П.* О технологии контроля напряженности электрического поля атмосферы и облаков с помощью самолетов-лабораторий. // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. — ISSN 2220–2609. № 16. г. Муром. 2014. С. 41–45.
6. *Торгунаков, Р. Е., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А.* О методике измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата. // *Труды ГГО*. 2015. вып. 579. С. 214–231.
7. *Чубарина Е. В.* К методике обработки данных высотных измерений напряженности электрического поля атмосферы // *Труды ГГО*. 1977. вып. 350. С. 87–90.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Современные проблемы моделирования климата и его изменений

Е. М. Володин

Институт вычислительной математики РАН, Москва

Мировое научное сообщество, развивающее климатические модели, ставит перед собой следующие основные вопросы, которые можно разрешить с помощью таких моделей. Это воспроизведение современного климата и понимание механизмов его формирования; моделирование климатов прошлого и понимание основных причин отличия прошлых климатов от современного; прогноз вероятных будущих изменений климата. Рассматривается семейство климатических моделей, разработанных в ИВМ РАН и некоторые результаты численных экспериментов, проведенных с ними. Численные эксперименты посвящены решению перечисленных выше вопросов в рамках международной программы по сравнению климатических моделей (CMIP). Дается обзор CMIP6. Анализируется воспроизведение изменений климата в 20 и начале 21 века, естественные колебания климата на временных масштабах десятилетий и их возможные механизмы. Рассматривается моделирование климата оптимума голоцена, микулинского межледниковья, максимума последнего оледенения, в том числе с моделью, включающей интерактивные ледовые щиты. Обсуждается проблема оценки вероятных будущих изменений климата.

Численное моделирование геофизической турбулентности

А. В. Глазунов¹, Е. В. Мортиков^{1,2}

¹ Институт вычислительной математики РАН, Москва

² Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Представлены вычислительные технологии расчета турбулентных течений в пограничных слоях атмосферы и океана, основанные на двух подходах: прямом численном моделировании (DNS) и вихреразрешающем моделировании (LES). Соответствующие численные модели [1, 2] разработаны в Институте вычислительной математики РАН и Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ им. М.В. Ломоносова. Модели основаны на оригинальных методах численного решения уравнений гидродинамики и на новых подходах к построению «подсеточных» замыканий. Они имеют эффективную параллельную реализацию, позволяющую использовать гетерогенную архитектуру современных суперкомпьютеров. Рассматривается ряд модельных задач по воспроизведению идеализированных стратифицированных течений при больших числах Рейнольдса и геофизических турбулентных течений в пограничных слоях атмосферы над неоднородными поверхностями [3, 4]. Эти расчеты необходимы для уточнения и построения перспективных параметризаций турбулентности в моделях крупномасштабной циркуляции атмосферы и океана. Обсуждаются методы расчета траекторий лагранжевых частиц в LES-моделях и способы описания мелкомасштабной «подсеточной» турбулентности при совместном численном моделировании течений и динамики безынерционных и тяжелых частиц. Приводятся примеры задач, решаемых при помощи такого моделирования. В частности, рассматриваются задачи по локализации источников концентрации примесей [5], а также задачи по изучению турбулентного переноса взвесей тяжелых частиц (снега, пыли) в приземном слое.

Литература

1. *Глазунов А. В.* Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического локализованного замыкания. Часть 1. Формулировка задачи, описание модели и диагностические численные тесты // Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 7–28.
2. *Мортиков Е. В.* Применение графических процессоров для численного моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости в областях сложной конфигурации метода погруженной границы // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т. 13. № 1. С. 177–191.
3. *Глазунов А. В.* Численное моделирование устойчиво-стратифицированных турбулентных течений над поверхностью городского типа. Спектры и масштабы, параметризация профилей температуры и скорости // Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 4. С. 406–419.

4. *Мортиков Е. В.* Численное моделирование движения ледяного кия в стратифицированной жидкости // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 120–128.
5. *Glazunov A., Rannik U., Stepanenko V., Lykosov V., Auvinen M., Vesala T., Mammarella I.* Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer // Geoscientific Model Development. 2016. V. 9. № 9. P. 2925–2949.

Предсказуемость и чувствительность климатических моделей

А. С. Грицун

Институт вычислительной математики РАН, Москва

В докладе рассматриваются несколько методов оценки потенциальной предсказуемости климатической системы по начальным условиям и правой части, основанных на использовании данных наблюдений (моделирования), и не требующих проведения ансамблевых расчетов.

Метод аналогий. Метод заключается в построении «возмущенного» ансамбля состояний системы из равновесного следующим способом [1]. Рассмотрим траекторию системы за достаточно длительный период $\{X(K), K = 1 \dots N\}$. Для каждого $X(K)$ подберем такое состояние $X(M)$, что евклидово расстояние между $X(K)$ и $X(M)$ минимально. При этом близкие по времени состояния не рассматриваются. Полученный таким образом «неравновесный» ансамбль будет содержать «аналоги» (в смысле минимальности евклидова расстояния) соответствующих точек ансамбля состояний исходной траектории. Для оценки времени предсказуемости вычисляется среднеквадратичное (по ансамблю) расстояние (MSD) между траекториями, выпущенными из соответствующих пар точек в зависимости от времени. Если время эволюции ансамбля J достаточно велико, то близкие в начальный момент точки ансамбля удаляются, в среднем, на «среднеклиматическое» расстояние. При этом, информация о начальном состоянии теряется, и такое время J может служить оценкой длины интервала предсказуемости. Данная методика была применена для оценки предсказуемости циркуляции океана в моделях INMCM4 и INMCM5. Для анализа использовалось поле среднегодовой температуры верхнего слоя океана (на глубине 0–300 м) в Атлантике (20–75N, 80–0W) и Тихом океане (20–65N, 120E–110W). Расчеты позволяют сделать вывод, что в двух моделях оценка времени предсказуемости, сделанная таким способом, составляет 2–3 года для Тихого океана и 4–5 лет для Атлантики, модель INMCM5 более предсказуема в Тихом океане.

Метод построения LIM (обратной линейной модели). Недостатком предыдущей методологии является необходимость использования длинных рядов данных (необходимо обеспечить близость пар «аналогов»). Кроме того, метод не позволяет оценивать предсказуемость, обусловленную сигналом от среднего состояния возмущенного ансамбля (ансамбль «аналогов» строится по данным равновесной траектории и имеет близкую к нулю аномалию среднего).

По определению [2] дополнительная информация в распределении (ансамбле) F по отношению к климатическому ансамблю выражается много-

мерным интегралом (информационной энтропией). Из практических соображений, климатическое распределение и прогностический ансамбль F предполагаются нормальными распределениями, при этом формула для информационной энтропии значительно упрощается. При построении обратной линейной модели [3] предполагается, что исходную нелинейную систему можно заменить на линейную динамико-стохастическую модель, оператор которой устойчив по Ляпунову, а зависящий от времени форсинг в правой части представляет собой белый шум по времени. Линейный оператор строится по данным исходной модели как матричный логарифм произведения ковариационной матрицы с запаздыванием на обратную ковариационную матрицу. Используя соответствующие выражения, можно получить приближенное соотношение для информационной энтропии. При этом, естественно, предполагается, что динамика исходной системы может быть с высокой точностью приближена линейной динамико-стохастической моделью. Описанная выше методика была реализована для моделей INMCM. Результаты вычислений в целом подтверждают сделанные выше выводы. Циркуляция в моделях более предсказуема в Атлантике, длина интервала предсказуемости в Тихом океане в модели INMCM5 на год больше.

Предсказуемость по правой части. Для оценки предсказуемости системы по отношению к внешним воздействиям может быть использована методика, основанная на применении флуктуационно-диссипационных соотношений, подробно описанная в работе [4]. Методика реализовывалась и тестировалась на примере климатической модели CCSM4, для которой был предварительно рассчитан длинный ряд данных (16000 лет), позволяющий детально оценить точность метода. Было показано, что для успешной реализации метода необходимо наличие значительно более длинных рядов данных моделирования (порядка 3–4-х тысяч лет) вместо имеющихся 500–750 лет для моделей INMCM. Для модели NCAR CCSM4 метод был успешно реализован и показал высокую точность.

Литература

1. *Branstator G., Teng H., Meehl G. A., Kimoto M., Knight J. R., Latif M., Rosati A.* Systematic estimates of initial-value decadal predictability for six AOGCMs // *J. Climate*. 2012. V. 25. P. 1827–1846.
2. *Kleeman R.* Measuring dynamical prediction utility using relative entropy // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59. P. 2057–2072.
3. *Penland C., Sardeshmukh P. D.* Error and sensitivity of geophysical eigensystems // *J. Climate*. 1995. V. 8. P. 1988–1998.
4. *Gritsun A., Branstator G.* Numerical aspects of applying the fluctuation dissipation theorem to study climate system sensitivity to external forcings // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2016. V. 31. № 6. P. 339–354.

Об энергетике молниевых вспышек и распределении грозовой активности по земному шару

Е. А. Мареев

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Доклад посвящен до сих пор остающимся нерешенными проблемам энергетике молнии и параметризации грозовой активности в моделях прогноза погоды и климата. Основное внимание уделено физическим процессам и механизмам, определяющим статистические распределения молниевых вспышек по току и энергии, а также распределение молниевой активности по земному шару. Рассмотрена также проблема молний с экстремальными параметрами и их связь с наиболее интенсивными метеорологическими явлениями и лесными пожарами.

При исследованиях энергетике молнии основное внимание уделяется обычно изучению так называемой главной стадии молнии, так как именно с ней связаны наиболее масштабные и разрушительные явления [1]. Важным параметром является общее энерговыделение в проводящем плазменном канале молнии, а также величина энергии, конвертированной в кинетическую, и излученной энергии. В настоящее время в различных газодинамических моделях главной стадии молнии значения энерговыделения варьируют от 2000 до 200000 Дж/м, процент излученной энергии — от 25% до 70%. Кроме газодинамического расширения канала, ионизации, излучения света и выделения тепла, некоторые модели учитывают диффузионные потоки массы и энергии, а также самовоздействие тока, текущего по каналу. В части работ величина общего энерговыделения считается заданной, в других она рассчитывается исходя из проводимости плазменного канала. Наиболее полная численная модель главной стадии к настоящему времени разработана авторами работ [2, 3]. Разработка самосогласованной теории главной стадии молнии, включая исследование динамики преобразования канала лидера на стадии возвратного удара с учетом его неоднородной структуры, и оценки диссипации энергии, идущей на нагрев и излучение в разных диапазонах длин волн, остается одной из наиболее насущных задач.

Большое значение для понимания закономерностей молниевой активности имеют статистические свойства молний, в частности, статистика средних и пиковых токов. Одно из главных и наиболее авторитетных свидетельств в пользу того, что статистические распределения основных параметров молниевых вспышек (включая пиковые токи, перенесенные заряды, энергию, временные длительности целых вспышек, отдельных компонент и различных их стадий и др.) близки к логнормальному, — результаты прямого измерения токов молниевых вспышек, опубликованные в работе [4]. Эта работа до сих пор считается актуальной и кладется в основу различных

стандартов для инженерных приложений [5]. Исследование статистики пиковых токов и других параметров молниевых вспышек остаётся актуальной задачей (см., например, последние результаты для оценки пиковых токов с помощью системы локации молний NLDN в [6] и результаты для параметров триггерной молнии в [7]), однако в большинстве работ на эту тему приводятся только данные и их основные статистические характеристики, а сами законы распределения подробно не анализируются. В частности, до сих пор не решена имеющая фундаментальное значение задача о механизмах, приводящих к логнормальному или почти логнормальному распределению основных параметров.

Моделирование климата с использованием физико-математических моделей высокого разрешения в последнее время стало одним из важнейших инструментов изучения климата и его изменений. Учет атмосферных электрических явлений в климатических моделях высокого разрешения связан, однако, с рядом проблем, наиболее актуальной из которых является необходимость параметризации количества и интенсивности грозовых облаков и молниевых вспышек в зависимости от основных физических характеристик конвективной облачности. В данном докладе затронуты вопросы дальнейшего развития физических параметризаций, которые дадут возможность учесть обратные связи между электрическими явлениями, изменениями состава и радиационным балансом атмосферы.

Первые параметризации средней частоты молниевых вспышек, предназначенные для использования в климатических моделях, были предложены Прайсом и Риндом [8, 9]. Частота вспышек была параметризована как функция максимальной высоты конвективного облака. При этом для гроз над континентами и над океанами использовались различные параметризации. В дальнейшем эти параметризации неоднократно использовались для изучения эффектов, обусловленных молниевыми вспышками – в основном, при исследовании возмущений состава атмосферы (см. подробнее обзор [10]). В последнее время были проведены численные эксперименты с использованием модели климата INMCM4, разработанной в ИВМ РАН и включающей модель атмосферы с разрешением $2 \times 1,5$ градуса по долготе и широте и 21 уровнем по вертикали, и модель океана с разрешением $1 \times 0,5$ градуса по долготе и широте и 40 уровнями по вертикали. Проведен численный эксперимент по воспроизведению климата и его изменений в 1891–2010 гг., результаты которого неплохо соответствуют современным наблюдательным данным [11]. С использованием предложенных параметризаций дан прогноз эволюции темпа молниевых вспышек и ионосферного потенциала глобальной электрической цепи в XXI веке. В среднем по земному шару ожидается рост частоты вспышек на 5 вспышек в год на 1°C (при получающейся в модели на текущий момент частоте 60 вспышек в секунду). Как показывают расчеты авторов работы для территории США [12] с ис-

пользованием модифицированной параметризации, получаются примерно такие же региональные тренды роста числа вспышек (около 8% на 1°C).

Следует отметить, что параметризация количества вспышек, основанная на использовании данных по высоте грозового облака, имеет целый ряд недостатков, которые обсуждались в литературе (см., например, [12, 13]). Отмечалось, в частности, что высота верхней кромки облака может быть достаточно большой при отсутствии активных восходящих потоков, т.е. высокой молниевой активности. Были развиты параметризации, основанные на сочетании учета скрытой теплоты конденсации и высоты облака, скорости конвективного потока, доступной конвективной потенциальной энергии, отличиях в спектрах CCN ядер в облаках над океаном и над сушей и другие. Как показывают расчеты, проведенные с целью сравнения разных параметризаций на модели ECHAM5/MESy [13], ни одну из этих параметризаций нельзя считать совершенной, но с физической точки зрения использование зависимости темпа вспышек от скорости конвективного потока выглядит предпочтительнее. Отметим, что развитая авторами работы [14] новая параметризация учитывает вертикальный градиент горизонтальной скорости ветра, что приводит к широтному распределению молний, лучше соответствующему наблюдениям [15], в том числе с учетом изменчивости грозовой активности на временном масштабе Эль-Ниньо.

В последнее время, как уже упоминалось, интенсивно исследуется влияние молний на состав атмосферы, прежде всего на производство окислов азота [10], в том числе с помощью химико-климатических моделей [16]. Дискуссионным остается вопрос об уровне регионального загрязнения окислами и азота и озона при повышенной частоте внутриоблачных разрядов. Дальнейшее развитие физических параметризаций позволит учесть обратные связи между изменением содержания окислов азота, последующим изменением концентраций озона и других атмосферных газов, способным повлиять на метеорологические условия и, соответственно, на скорость образования окислов азота в молниевых разрядах. Это даст возможность также оценить риск поражающего воздействия молниевых разрядов разной полярности и анализ возможных методов снижения этих рисков.

Одним из наиболее интересных вопросов является изучение эффектов и оценки рисков пожаров, вызванных разрядами облако–земля различной полярности, прежде всего положительных разрядов, обладающих более высокими пиковыми токами и часто сопровождаемых длительной стадией непрерывного тока [1, 4]. С учетом возможных обратных связей, обусловленных, в частности, влиянием связанных с пожарами аэрозольных частиц [17], включение этих эффектов в климатические модели может привести к существенному перераспределению областей грозовой активности и площади, занятой пожарами на региональном и даже на глобальном масштабе.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке РФФ (грант 16-17-00132).

Литература

1. *Rakov V.A.* The physics of lightning // *Surv. Geophys.* 2013. V. 34. № 6. P. 701–729.
2. *Ripoll J.-F., Zinn J., Jeffery C. A., Colestock P. L.* On the dynamics of hot air plasmas related to lightning discharges: 1. Gas dynamics // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 9196–9217. doi:10.1002/2013JD020067.
3. *Ripoll J.-F., Zinn J., Colestock P. L., Jeffery C. A.* On the dynamics of hot air plasmas related to lightning discharges: 2. Electrodynamics // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. V. 119. P. 9218–9235. doi:10.1002/2013JD020068.
4. *Berger K., Anderson R.B., Kröninger H.* Parameters of Lightning Flashes // *Electra.* 1975. V. 80. P. 23–37.
5. *CIGRE Working Group C4.407. Brochure 549. Lightning Parameters for Engineering Applications.* Paris: CIGRÉ. 2013.
6. *Nag A., Murphy M.J., Cramer J.A.* Recent Update to the U.S. National Lightning Detection Network // 24th International Lightning Detection Conference and 6th International Lightning Meteorology Conference, San Diego, California, USA, 2016, 18–21 April.
7. *Schoene J., Uman M.A., Rakov V.A., et al.* Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D03106.
8. *Price C., Rind D.* A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions // *J. Geophys. Res.* 1992. V.97. P. 9919–9933.
9. *Price C., Rind D.* What determines the cloud-to-ground lightning fraction in thunderstorms? // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V.20. P. 463–466.
10. *Schumann U., Huntrieser H.* The global lightning-induced nitrogen oxides source, *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P.3823–3907.
11. *Mareev E. A., Volodin E. M.* Variation of the global electric circuit and Ionospheric potential in a general circulation model // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. doi:10.1002/2014GL062352.
12. *Romps D.M., Seeley J. T., Vollaro D., Molinary J.* Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming // *Science.* 2014. V. 346 (6211). P. 851–854. doi:10.1126/science.1259100.
13. *Tost H., Jockel P., Lelieveld J.* Lightning and convection parameterizations - uncertainties in global modeling // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 3823–3907.
14. *Mareev E. A., Volodin E. M., Slyunyaev N. N.* Mechanisms of Global electric circuit and lightning variability on the ENSO time scale // *Proc. EGU GA, oral EGU2017-16970, Vienna, April 2017.*
15. *Sátori G., Williams E., Lempferger I.* Variability of global lightning activity on the ENSO time scale // *Atmos. Res.* 2009. V. 91. P. 500–507.
16. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я.* Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46. № 4. С. 487–504.
17. *Altartz O., Koren I., Yair Y., Price C.* Lightning response to smoke from Amazonian fires // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L07801. doi:10.1029/2010GL042679.

Параметризация гидрологических объектов на суше в моделях Земной системы

В. М. Степаненко

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

Доклад посвящён параметризации водных объектов — водоёмов и водотоков — в схемах деятельного слоя моделей климатической системы.

Рассматривается характер энергообмена водоёмов суши с атмосферой и связанные с ним мезомасштабные атмосферные циркуляции. Приводятся эмпирические обобщения о потоках метана и углекислого газа с водоёмов суши. Излагаются основы одномерного моделирования водоёмов, включая термо-, гидродинамику, параметризации турбулентного обмена. Перечисляются примеры эффектов на циркуляцию и термический режим атмосферы от внедрения параметризаций водоёма в системы прогноза погоды и модели климата. Разбираются подходы к моделированию биогеохимических процессов, причастных к производству и потреблению парниковых газов в пресноводных водоёмах. Описываются натурные наблюдения на озёрах, их возможности и ограничения при валидации моделей. Формулируются перспективные направления дальнейшего развития параметризаций водоёмов суши.

Рассматривается современное состояние описания речных систем в моделях Земной системы. Формулируются требования к параметризации речных потоков с учётом текущих представлений о роли этой компоненты гидрологического цикла в климатической системе. Приводятся варианты описания динамики речных потоков, а также поля внешних параметров, необходимые для реализации уравнений динамики и сохранения массы на глобальной сетке.

Математическое моделирование динамики атмосферы и задача прогноза погоды

Р. Ю. Фадеев

Институт вычислительной математики РАН, Москва

Математические модели динамики атмосферы являются одним из основных инструментов изучения и прогноза состояния атмосферы. В основе таких моделей находятся осредненные уравнения Навье-Стокса (уравнения Рейнольдса) на вращающейся сфере [1]. Эффект физических процессов с характерным масштабом меньше шага расчетной сетки (например, образование и выпадение осадков, конвекция и т.д.) учитывается в виде слагаемых правой части этой системы уравнений. Повышение точности воспроизведения атмосферной циркуляции обеспечивается, главным образом, за счет увеличения пространственного разрешения модели, усовершенствования и внедрения новых параметризаций процессов подсеточного масштаба.

Развитие моделей общей циркуляции атмосферы в последние годы осуществляется также за счет подключения новых моделей-компонент Земной системы. Например, в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды и метеослужбе Великобритании готовятся применять совместные модели атмосферы, Мирового океана и морского льда для среднесрочного прогноза погоды на срок до 10 суток. В Гидрометцентре России для оперативного среднесрочного прогноза погоды с заблаговременностью до 10 суток с 2010 года применяется глобальная модель атмосферы ПЛАВ [2]. Эта модель является одним из компонентов разрабатываемой в ИВМ РАН, ИО РАН и Гидрометцентре России совместной модели атмосферы, океана и морского льда, предназначенной для прогноза на сезон и моделирования изменений климата на срок до 10 лет [3].

Цель доклада — дать представление о принципах построения численных гидродинамических моделей атмосферы, применяемых в них вычислительных технологиях, путях интенсивного и экстенсивного развития.

Литература

1. *Толстых М. А.* Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. №. 359. С. 5–32.
2. *Толстых М. А.* Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды // М., Обнинск: ОАО ФОП, 2010. 111 С.
3. *Fadeev R. Yu. et al.* Coupled atmosphere–ocean model SLAV–INMIO: implementation and first results // RJNAMM. 2016. V. 31. № 6. P. 329–337.

Исследование главных мод естественной изменчивости в климатической модели ИВМ РАН

*В. В. Воробьева*¹, *Е. М. Володин*²

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

² Институт вычислительной математики РАН, Москва

В данной работе используется аппарат эмпирических ортогональных функций для вычисления главных мод естественной изменчивости климатической системы.

Введём понятие эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), как это сделано в [1]. На начальном этапе аппарат ЭОФ-анализа в модели ИВМ РАН был применён к данным среднемесячных значений давления на уровне моря в северном полушарии. На графике (рис. 1) представлена первая ЭОФ.

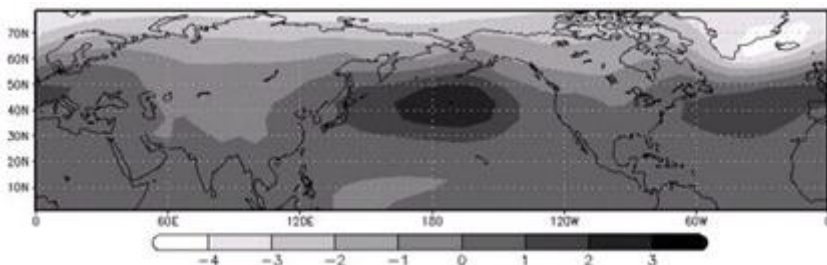


Рис. 1. Первая ЭОФ среднемесячного давления на уровне моря в северном полушарии, построенная по данным модели ИВМ РАН.

Видно, что первая ЭОФ выражается в уменьшении давления в высоких широтах и его увеличении в субтропиках. Также видно, что максимумы давления наблюдаются над океанами. Эти результаты соответствуют наблюдениям, в природе такое явление называется арктическим колебанием.

Далее рассмотрим первую ЭОФ, построенную для данных модели по среднемесячной температуре поверхности Тихого океана в тропиках (рис. 2). Данный рисунок довольно хорошо сопоставляется с данными наблюдений природной аномалии ТПО во время Эль-Ниньо.

Кроме того, была проведена обработка данных, выдаваемых моделью, а именно, температуры воздуха на различных высотах и широтах, осредненной вдоль долготы. Выдача модели содержит данные аномалии температуры за 199 лет, начиная с августа 1-го года и заканчивая июлем 200-го года. Из данных перед расчетом ЭОФ был вычтен среднеклиматический годовой ход, и оставлено только северное полушарие, начиная с $18,75^\circ$ с.ш.. Для данной величины были вычислены первые пять ЭОФ. На графике (рис. 3) представлен первый ЭОФ температурной аномалии на $84,75^\circ$ с.ш.. Видно, что в

течение зимнего периода аномалии температуры опускаются вниз, происходит потепление стратосферы. Этот процесс отражает картину внезапного стратосферного потепления.

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке РФФ, грант 14-27-00126.

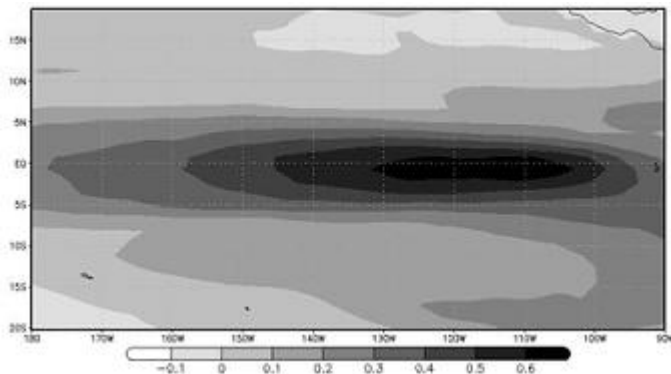


Рис. 2. Первая ЭОФ среднемесячной температуры поверхности Тихого океана в тропических широтах, построенная по данным модели ИВМ РАН.

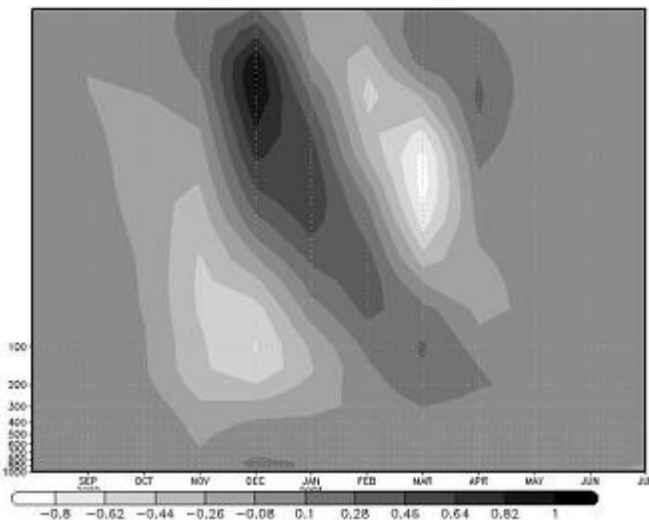


Рис. 3. Первая ЭОФ температуры воздуха на различных высотах, усредненной вдоль долготы, на широте $84,75^\circ$.

Литература

1. Володин Е. М. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы. Курс лекций / М.: ИВМ РАН. 2007. 89 С.

Реализация параллельного алгоритма решения эллиптических уравнений в глобальной модели атмосферы

Г. С. Гойман

Московский физико-технический институт, Долгопрудный

В глобальной модели атмосферы ПЛАВ [6] применяется полуявный полулагранжев [1] метод интегрирования по времени совместно с пространственной дискретизацией уравнений, сформулированных в терминах вихрь-дивергенция, на несмещенной Z-сетке. Использование такого подхода приводит к необходимости решения на каждом шаге по времени набора двумерных эллиптических уравнений:

$$(k^2 - \Delta)\psi = R, \quad k \geq 0, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{a^2 \cos \varphi \partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \right).$$

Здесь λ , φ — долгота и широта; a — радиус Земли. Применяемый на данный момент прямой алгоритм решения этих уравнений, основанный на аппроксимации в пространстве Фурье и векторной прогонке [4], не позволяет эффективно использовать двумерную декомпозицию расчетной области по MPI-процессам.

В работе представлены результаты внедрения конечно-разностной аппроксимации эллиптических уравнений. Предлагается использовать стандартную пятиточечную конечно-объемную аппроксимацию второго порядка точности [2]. Для решения возникающей вследствие дискретизации системы, используется параллельный многосеточный метод [4], основанный на методе условного сгрубления сеток [5]. На рисунках 1, 2 приведены графики сходимости и сильной масштабируемости многосеточного алгоритма.

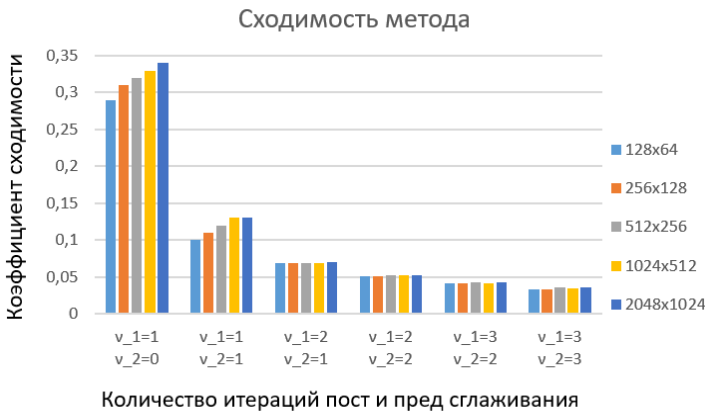


Рис. 1. Сходимость метода в зависимости от количества итераций сглаживания.

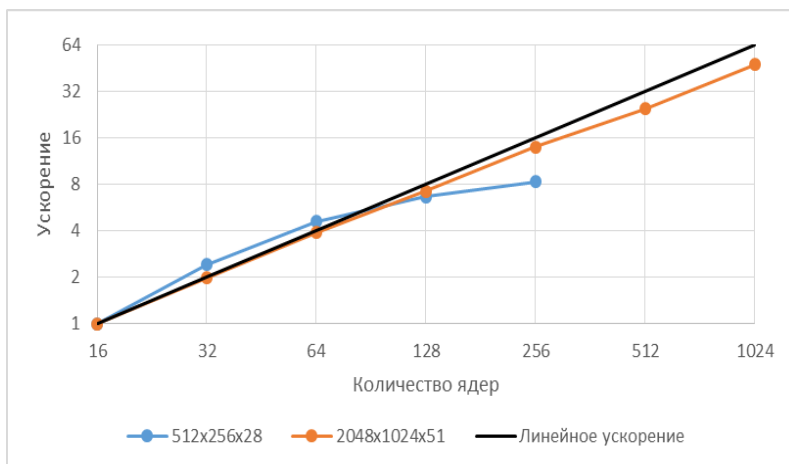


Рис. 2. Сильная масштабируемость алгоритма.

Показано, что применение нового подхода не влияет на точность модели.

Литература

1. *Andr'e Robert* A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations // Atmos. Ocean. 1981. V. 19. № 1. P. 35–46.
2. *Barros S. R. M.* Multigrid methods for two-and three-dimensional Poisson-type equations on the sphere // J. Comput. Phys. 1991. V. 92. №. 2. P. 313–348.
3. *Tolstykh M.* Vorticity-divergence semi-Lagrangian shallow-water model on the sphere based on compact finite differences // J. Comput. Phys. 2002. V. 179. P. 180–200.
4. *Trottenberg U., Oosterlee C. W., Schuller A.* Multigrid / Academic press, 2000. 631 P.
5. *Larsson J., Lien F. S., Yee E.* Conditional semicoarsening multigrid algorithm for the Poisson equation on anisotropic grids // J. Comput. Phys. 2005. V. 208. №. 1. P. 368–383.
6. *Толстых М. А.* Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды / М. Обнинск: ОАО ФОП. 2011. 111 С.

Исследование влияния численных схем и подсеточных параметризаций на статистические характеристики моделируемой двумерной турбулентности

П. А. Пережогин^{1,2}, А. В. Глазунов¹, А. С. Грицун¹

¹ Институт вычислительной математики РАН, Москва

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Проведено исследование влияния численных схем и стохастических подсеточных параметризаций на статистические характеристики моделируемой турбулентности. В качестве модельной задачи была выбрана динамика двумерной жидкости в периодической области, форсируемой стохастическим внешним воздействием заданного пространственного масштаба. Такая задача является простейшим аналогом квазидвумерных крупномасштабных турбулентных течений в атмосфере и океане.

Получены следующие результаты:

1) Проведен сравнительный анализ численных аппроксимаций, применяемых в задачах моделирования атмосферы и океана, в частности в климатической модели ИВМ РАН INMCM и модели среднесрочного прогноза ПЛАН. Проверена способность различных конечно-разностных и полулагранжевых схем достоверно воспроизводить двунаправленный каскад энергии и энтропии при грубом пространственном разрешении.

2) По данным прямого численного моделирования проведен априорный анализ взаимодействия мелкомасштабных и крупномасштабных компонент течения. На его основе получены спектральные характеристики подсеточных сил для модели с грубым разрешением с учетом выбранной пространственной аппроксимации. Предложены, реализованы и протестированы различные варианты стохастических подсеточных моделей. Показано, что при помощи крупномасштабного стохастического форсинга, имитирующего взаимодействия между «подсеточными» и разрешаемыми гармониками, можно значительно улучшить динамику грубой модели в интервале обратного каскада энергии.

В работе [1] мы исследовали широкий класс схем на предмет воспроизведения обратного каскада энергии. Было показано, что обратный каскад нарушается в случае мелкомасштабного форсинга. Проблема была решена с помощью стохастической параметризации. Были проведены численные эксперименты без стохастической параметризации и в случае ее наличия. На рисунке изображены спектры энергии до (NO SKEBS) и после включения (SKEBS) стохастической параметризации. Динамика крупных масштабов восстанавливается, а средние масштабы приближаются к DNS. Поскольку крупные масштабы были восстановлены, скорость адвекции приблизилась к DNS, и это отразилось на улучшении автокорреляционных функций фурье-

коэффициентов завихренности в средних масштабах (рисунок не приведен). Кроме того, по причине верного воспроизведения дисперсии и времени изменчивости динамических переменных на интервале обратного каскада энергии, чувствительность к постоянному возмущению также улучшилась (рисунок не приведен). В DNS-расчете на масштабе форсинга имеются мелкие вихри, которые отсутствуют в грубых моделях. После включения стохастической параметризации вихри не появились, а спектр энергии в мелких масштабах не изменился. Таким образом, динамика крупных масштабов была восстановлена в отсутствие значительных изменений в мелких масштабах.

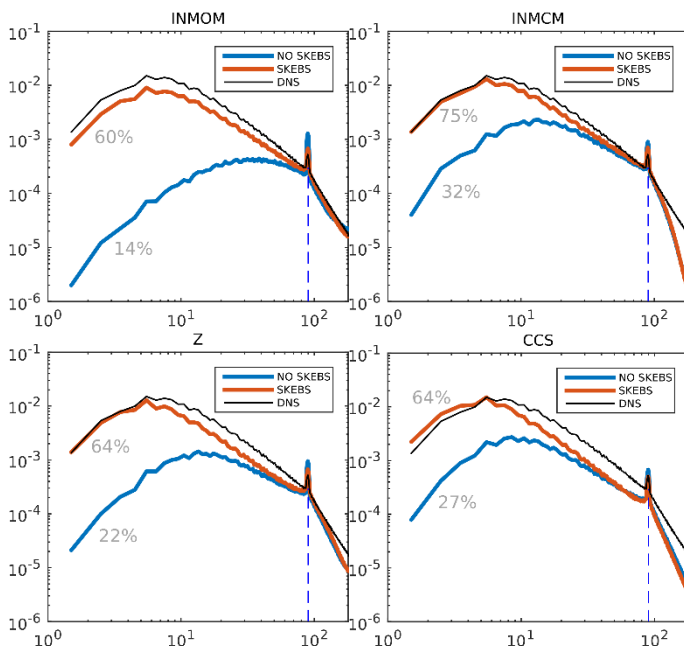


Рис. Спектр энергии для четырех схем (INMOM, INMCM, Z, CCS) до включения стохастической параметризации (NO SKEBS), после включения (SKEBS) в сравнении с DNS-расчетом. Серым обозначен процент энергии от DNS.

Литература

1. *Perezhogin P. A., Glazunov A. V., Mortikov E. M., Dymnikov V. P.* Comparison of numerical advection schemes in two-dimensional turbulence simulation // *Rus. J. of Numer. Analysis and Math. Modelling.* 2017. V. 32. № 1. P. 1–14.

Оценка чувствительности глобальной модели состава тропосферы и стратосферы к метеорологическим данным и граничным условиям

М. В. Черепова, С. П. Смышляев

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Глобальная модель состава тропосферы и стратосферы, разработанная на основе химико-климатической модели нижней и средней атмосферы [1], предназначена для исследования короткопериодной и длиннопериодной изменчивости содержания атмосферных газов. В отличие от химико-климатической модели, в модели состава тропосферы и стратосферы метеорологические характеристики (температура, скорости ветра, влажность воздуха и приземное давление) не рассчитываются, а задаются по данным реанализа. Модель предназначена для использования в режиме реального времени для оперативного прогнозирования изменчивости содержания загрязняющих компонентов в тропосфере и газового состава стратосферы, поэтому крайне важной является оценка чувствительности модели к начальным данным и граничным условиям.

Для оценки чувствительности модели состава тропосферы и стратосферы к метеорологическим данным и граничным условиям выполнялись численные эксперименты по расчету изменения газового состава тропосферы и стратосферы в 2009–2016 гг. При этом метеорологические характеристики задавались по данным реанализа MERRA, ERA-Interim и JRA, а потоки газов с поверхности — по данным EDGAR, MEGAN и MACCity. Результаты расчетов сравниваются с результатами спутниковых и наземных измерений и данными моделирования с использованием химико-климатических моделей. Совместный анализ результатов моделирования и наблюдений позволяет оценить значимость химических и динамических процессов в наблюдаемой короткопериодной и долгопериодной изменчивости содержания атмосферных газов в тропосфере и стратосфере.

Глобальная модель состава тропосферы и стратосферы позволяет математически описать химические и физические процессы, протекающие в атмосфере и влияющие на распределение и изменчивость атмосферных газов. Оценка чувствительности модели позволяет выбрать оптимальные условия для оперативного использования подобной модели.

Литература

1. *Галин В. Я., Смышляев С. П., Володин Е. М., Галин В. Я.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Известия РАН. Сер. ФАО. 2007. Т.43. № 4. С. 437–452.

Моделирование ледникового ветра и его валидация над ледником Консвеген (Шпицберген)

Р. В. Чернышев¹, В. М. Степаненко¹, И. А. Репина²

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

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

Современные прогностические и климатические модели обладают недостаточным вертикальным шагом для разрешения ледникового ветра. Целью работы стало построение собственной модели ледникового ветра, основанной на системе термогидродинамических уравнений.

Для создания модели решено было использовать нестационарность процесса в двумерном пространстве в координатах склона. Была составлена система термогидродинамических уравнений, состоящая из уравнения движения вдоль склона с учетом плавучести и уравнения притока тепла. Полученная система была решена явным конечно-разностным методом и проверена с существующей аналитической системой Прандтля [1]. После проверки численной схемы была проведена верификация модели с экспериментальными данными. Используемые данные были получены в результате измерений на леднике Консвеген в рамках международной Российско-Нидерландской экспедиции весной 2009. Измерения проводились с помощью градиентной мачты с датчиками на 6 уровнях и содара [2].

В реальной атмосфере постоянный с высотой коэффициент практически не встречается. Поэтому для расчета коэффициента в слое ниже 20 метров было решено использовать экспоненциальный профиль, стремящийся к значению калибровочных констант [3]. Константы k_m и k_t были откалиброваны во время тестовых запусков модели, и их значения были приняты за 0,4 и 0,9 м²/с соответственно. Полученный результат хорошо описывает профиль ветра и температуры.

С помощью содара были получены значения дисперсии радиальных скоростей ветра на каждом измеряемом уровне. Зная связь между дисперсиями скоростей и коэффициентом обмена, был рассчитан высотный профиль коэффициента. Полученный профиль расположен над моделируемым профилем, однако профили сошлись на границах расчета, что является положительным результатом.

В результате была написана и верифицирована модель ледникового ветра. Также было учтен и откалиброван профиль коэффициента обмена. Модель была верифицирована с экспериментальными данными.

Литература

1. *Вельтицев Н. Ф., Степаненко В. М.* Мезометеорологические процессы / М.: МГУ. 2006. 101 С.
2. *Esau I. Repina I.* Wind climate in Kongsfjorden, Svalbard, and attribution of leading wind driving mechanisms through turbulence-resolving simulations // *Advances in Meteorology*. 2012. V. 2012. Article ID 568454. 16 P.
3. *Oerlemans J.* The Microclimate of Valley Glaciers / *Igitur*, Utrecht University. 2010. 138 P. ISBN 987-90-393-5303-5.

**ДИАГНОСТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-
ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ**

Фильтрация волновых полей в фазовом пространстве: приложение к задаче выделения отраженного луча

М. Е. Горбунов^{1,2}, Е. Cardellach³, К. В. Lauritsen⁴

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

² Гидрометцентр России, Москва

³ Каталонский Институт космических исследований, Барселона, Испания

⁴ Датский метеорологический институт, Копенгаген, Дания

Линейные и нелинейные представления волновых полей составляют основу современных алгоритмов анализа и обработки радиозатменных данных. Линейные представления задаются при помощи интегральных операторов Фурье [1–3] и позволяют восстанавливать профили углов рефракции с высоким вертикальным разрешением. Нелинейные представления [4–6] включают функцию Вигнера, являющуюся псевдо-плотностью энергии в фазовом пространстве. Представления позволяют строить алгоритмы фильтрации, основанные на подавлении определенных областей фазового пространства и вычислении обратного оператора, проецирующего поле в исходное представление. Мы применяем эту методику для восстановления лучей, отраженных от поверхности Земли, из радиозатменных данных [7–9]. Использование отраженных лучей может повысить точность восстановления атмосферного показателя преломления [10]. Отраженные лучи легко идентифицировать на двумерных графиках функции Вигнера или спектрограммах (рисунок).

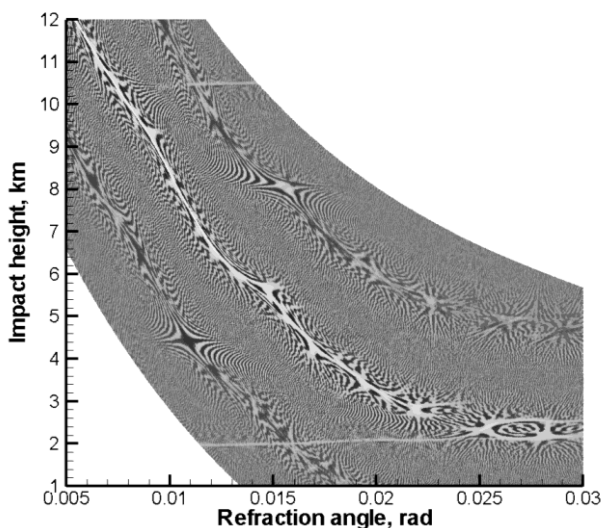


Рис. Функция Вигнера для радиозатменного сеанса наблюдений. Отраженные лучи соответствуют ветви профиля угла рефракции на высоте около 2 км.

Многочисленные примеры из данных эксперимента COSMIC показывают, что отражение чаще всего наблюдается над поверхностью океана или над снегом, в частности над Антарктидой. Мы определяем индекс отражения как величину характеризующую интенсивность отраженного луча по отношению к прямому лучу. Этот индекс позволяет реализовать автоматическую идентификацию сеансов измерений с отражениями. Мы используем радиологическую оценку ошибок восстановленных углов рефракции для отраженных лучей. Мы выполнили сравнение индекса, вычисленных при помощи зрительной идентификации отраженных лучей по спектрограммам [10], с нашим индексом, и нашли хорошее согласие.

Литература

1. *Gorbunov M. E.* Canonical transform method for processing GPS radio occultation data in lower troposphere // *Radio Science*. 2002. V. 37. № 5. P. 9-1–9-10.
2. *Gorbunov M. E., Lauritsen K. B.* Analysis of wave fields by Fourier Integral Operators and its application for radio occultations // *Radio Science*. 2004. V. 39. № 4. RS4010.
3. *Jensen A. S., Lohmann M. S., Nielsen A. S., Benzon H.-H.* Geometrical Optics Phase Matching of Radio Occultation Signals // *Radio Sci*. 2004. V. 39. № 3. RS3009.
4. *Gorbunov M. E., Gurvich A. S., Kornblueh L.* Comparative analysis of radioholographic methods of processing of radio occultation data // *Radio Science*. 2000. V. 35. № 4. P. 1025–1034.
5. *Gorbunov M. E.* Radioholographic analysis of radio occultation data in multipath zones // *Radio Science*. 2002. V. 37. № 1. P. 14-1–14-9.
6. *Gorbunov M. E., Lauritsen K. B., Leroy S. S.* Application of Wigner distribution function for analysis of radio occultations // *Radio Science*. 2010. V. 45. RS6011.
7. *Beyerle G., Hocke K.* Observation and Simulation of Direct and Reflected GPS Signals in Radio Occultation Experiments // *Geophys. Res. Lett*. 2001. V. 28. № 9, P. 1895–1898.
8. *Beyerle G., Hocke K., Wickert J., Schmidt T., Marquardt C., Reigber C.* GPS Radio Occultations with CHAMP: A Radio Holographic Analysis of GPS Signal Propagation in the Troposphere and Surface Reflections // *J. Geophys. Res*. 2002 V. 107. № D24, P. 27-1–27-14.
9. *Cardellach E., Oliveras S., Rius A.* Applications of the Reflected Signals Found in GNSS Radio Occultation Events // *Proc. of GRAS SAF Workshop on Applications of GPS radio occultation measurements, ECMWF, Reading, UK 16–18 June 2008*.
10. *Cardellach E., Oliveras S., Rius A.* GNSS Signal Interference Classified by means of a Supervised Learning Method Applied in the Time-Frequency Domain // *IEEE Proceedings of 2009 2nd Int. Congress on Image and Signal Processing, Tijuana, China, 17–21 October 2009*, published by Institute of Electrical and Electronic Engineers, ISBN 13: 978-1-4244-4130-3.
11. *Cardellach E., Oliveras S., Rius A.* Tropospheric Information Content Embedded in GNSS RO Reflected Signals // *The Int. Beacon Satellite Symposium BSS2010*.

Машинное обучение в задачах геофизики

Н. В. Ильин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород
Гидрометцентр России, Москва

Машинное обучение — очень мощный математический инструмент с хорошо развитой вычислительной инфраструктурой, который широко используется как в фундаментальных, так и в прикладных, инженерных задачах. Одной из основных целей техники машинного обучения является восстановление зависимости (корреляции, закона природы) по эмпирическим данным.

В данной лекции представлен обзор основ техники машинного обучения: стандартные типы и особенности постановок задач, проблема переобучения, оценки и меры качества и др. Обсуждаются различные методы решения (виды классификаторов), их преимущества и недостатки.

В качестве подробного примера использования машинного обучения в геофизике, рассмотрена задача прогноза молниевой активности по данным метеорологического радиолокатора.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ (Соглашение № 16-17-00132).

Непрямые методы определения распределений малых газовых составляющих мезосферы с помощью фотохимических моделей

М. Ю. Куликов, М. В. Беликович, Т. С. Ермакова, А. А. Нечаев, А. М. Фейгин
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В данном докладе, во-первых, проведено обсуждение непрямых методов извлечения информации о пространственно-временных распределениях ключевых малых газовых составляющих мезосферы по данным измерений озона и свечений возбужденных состояний молекулярного кислорода и гидроксила. На основании сгенерированного трехмерной химико-транспортной моделью годового цикла мезосферного озона представлены не учитываемые в настоящее время ограничения на применение условия фотохимического равновесия концентрации данной компоненты для восстановления атомарных кислорода и водорода.

Во-вторых, изложена общая стратегия статистического, основанного на теореме Байеса, восстановления неизвестных переменных и параметров фотохимической модели по зашумленным временным рядам экспериментальных данных. Основная ее идея заключается в построение совместной апостериорной плотности вероятности неизвестных параметров и латентных переменных модели при условии, что наблюдается конкретный временной ряд наблюдений. Представлены выражения для данной плотности вероятности в самом общем случае многомерной фотохимической системы, когда необходимо проводить статистическую оценку нескольких неизвестных параметров и латентных переменных по длинному зашумленному ряду измерений нескольких динамических переменных системы.

В-третьих, представлены результаты применения указанного подхода к мезосферной фотохимической системе для восстановления распределений малых газовых составляющих мезосферы (атомарных кислорода и водорода, гидроксила, гидропероксида и паров воды) по модельным и реальным данным наземных и спутниковых измерений.

В четвертых, на основании тройного фотохимического равновесия O_3 , OH и HO_2 в дневное время суток проведена валидация данных измерений этих компонент, полученных MLS Aura.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (соглашение № 15-17-10024 от 04 июня 2015 г.).

Изменчивость циклонической активности в Арктическом регионе по данным реанализа и модельным расчетам

М. Г. Акперов¹, И. И. Мохов^{1,2}

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

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

Выполнен анализ характеристик циклонической активности, полученных с использованием результатов расчетов с ансамблем региональных климатических моделей (Arctic CORDEX) для Арктического региона, а также по данным реанализа (ERA-Interim, NCEP-CFSR, JRA55, MERRA2). Характеристики циклонов (повторяемость, глубина, размер) анализировались для теплого и холодного периода за последние 30 лет (1981–2010 гг.). Отмечены разные тенденции изменчивости характеристик циклонической активности в Арктике по данным расчетов с РКМ. При этом характеристики циклонов, полученные с использованием региональных климатических моделей, в которых применялся метод «спектрального притягивания», наиболее адекватно воспроизводят их пространственное-временное распределение, а также межгодовую изменчивость. Отмечены также сильные вариации повторяемости мелких циклонов между разными данными, в частности, над континентами.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ № 14.616.21.0078.

Трёхмерное моделирование средней атмосферы для анализа возможности применения условия фотохимического равновесия мезосферного озона в обработке спутниковых данных

М. В. Беликович, М. Ю. Куликов, Т. С. Ермакова, А. М. Фейгин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Мезосфера — область атмосферы Земли, располагающаяся на высотах от 50 до 100 км. Интерес к исследованию процессов, протекающих в этой области атмосферы, связан с ее высокой чувствительностью к изменениям химического состава нижележащих слоев. В частности, обсуждается возможность использования различных характеристик мезосферы в качестве предикторов климатических изменений.

Основным источником экспериментальных данных о состоянии мезосферы являются дистанционные измерения. Прямому измерению доступен ограниченный набор химических компонент. Некоторые компоненты определяются опосредованно с использованием априорных предположений о состоянии мезосферной фотохимической системы. Одним из наиболее часто используемых предположений является гипотеза о фотохимическом равновесии мезосферного озона. Чтобы проверить справедливость данного предположения и найти границы его применимости, нами были проведены численные эксперименты с использованием химико-транспортных моделей.

В докладе представлено описание трехмерной химико-транспортной модели, разработанной в Институте физики атмосферы (г. Кюлунгсборн, Германия). Описаны численные схемы химических и транспортных блоков модели. Нетривиальность расчета химического блока связана с «жесткостью» системы уравнений химической кинетики, описывающей фотохимические процессы в мезосфере: во-первых, скорости различных реакций могут отличаться на несколько порядков, во-вторых, в зависимости от условий они могут существенно изменяться. Данная проблема решается в докладе с помощью реализации «концепции семей». Приведены результаты обработки симуляций, явно указывающие на ситуации, когда предположения о фотохимическом равновесии мезосферного озона не выполняются, что приводит к грубым ошибкам при обработке данных спутникового зондирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (соглашение № 15-17-10024 от 04 июня 2015 г.).

Некоторые аспекты влияния глобального потепления на состав приземного воздуха

Е. В. Березина

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

Одним из важнейших аспектов влияния глобального потепления на состав приземного воздуха на сегодняшний день является резкое увеличение приземного содержания биогенных летучих органических соединений (биогенных ЛОС), на долю которых приходится примерно 90% глобальных эмиссий ЛОС в атмосферу [1]. Вследствие высокой реакционной способности, биогенные ЛОС, среди которых наиболее распространены изопрен и монотерпены, играют важную роль в химических и физических атмосферных процессах. В условиях загрязнённого воздуха эти ЛОС способствуют образованию токсичных соединений [2, 3].

Главным фактором, регулирующим поступление биогенных ЛОС в атмосферу, является температура воздуха, рост которой не только стимулирует образование этих веществ в растениях, но и способствует увеличению продолжительности вегетационного периода, что приводит к росту эмиссий биогенных ЛОС в атмосферу. По некоторым оценкам [4], потепление климата за последние 35 лет могло способствовать росту глобальных эмиссий биогенных ЛОС примерно на 10%. Таким образом, дальнейшие изменения климата могут существенным образом повлиять на региональные изменения состава приземного воздуха.

Измерения биогенных ЛОС вдоль Транссибирской магистрали в ходе экспериментов TROICA на передвижной лаборатории летом 2008 г. показали, что с ростом температуры воздуха на 1°C приземная концентрация одного из ведущих биогенных ЛОС, изопрена, возрастает примерно на 0,1–0,3 ppbv в зависимости от типа растительности. Наибольший рост концентрации изопрена с ростом температуры вдоль Транссибирской магистрали наблюдался в широколиственных лесах. Кроме того, установлено, что на юге Восточной Сибири и на Дальнем Востоке концентрация изопрена максимальна (до 2 ppbv) и в условиях высокой температуры воздуха (>25°C) генерация озона за счёт изопрена может составлять 30–40 ppbv.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 14-47-00049) и РФФИ (проекты № 16-35-00158 и № 16-05-00109).

Литература

1. *Guenther A. B., Jiang X., Heald C. L., Sakulyanontvittaya T., Duhl T., Emmons L. K., Wang X.* The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions // *Geosci. Model Dev.* 2012. V. 5. P. 1471–1492.

2. *Chiemchaisri W., Wu J. S., Visvanathan C.* Methanotrophic production of extracellular polysaccharide in landfill cover soils // *Water Science and Technology*. 2001. V. 43 (6). P. 151–158.
3. *Mochizuki T., Miyazaki Y., Ono K., Wada R., Takahashi Y., Saigusa N., Kawamura K., Tani A.* Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent formation of secondary organic aerosols in a *Larix kaempferi* forest // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 12029–12041.
4. *Penuelas J., Staudt M.* BVOCs and global change // *Trends in Plant Science*. 2010. V. 15 (3). P. 133–144.

Долгосрочные прогнозы продолжительности отопительного периода для территории Приволжского федерального округа

Н. А. Важнова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Рассматриваются принципиальные основы метода прогноза продолжительности отопительного периода с учетом даты устойчивого осеннего перехода средней суточной температуры воздуха (ССТВ) через 8°C . Обсуждаются итоги 14-летних испытаний метода и перспективы его практического использования.

Установлено наличие высоконадежной, тесной отрицательной связи между изменениями дат устойчивых осенних переходов ССТВ через 8°C и продолжительности отопительного периода (ОП), пригодной для ее использования в прогностических целях.

Показано, что основным источником указанной отрицательной связи между изменениями дат устойчивых осенних переходов ССТВ через 8°C и продолжительности отопительного периода, является большая (по сравнению с устойчивостью дат осенних переходов) устойчивость дат устойчивых весенних переходов ССТВ через 8°C . Как следствие, ранние осенние переходы ССТВ через 8°C сопровождаются (в большинстве) увеличением продолжительности ОП, и наоборот.

Мезомасштабная циркуляция в атмосферном пограничном слое: наблюдения и моделирование

Н. В. Вазаева^{1,2}, *О. Г. Чхетиани*^{1,3}, *Л. В. Шестакова*⁴, *Л. О. Максименков*¹

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

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

³ Институт космических исследований РАН, Москва

⁴ Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Пермь

Рассматриваются нелинейные режимы развития упорядоченных структур в экмановском слое. Результаты расчетов сравниваются с наблюдаемыми характеристиками и данными, полученными численным моделированием структур в атмосферном пограничном слое (АПС).

В зависимости от числа Рейнольдса реализуются различные типы гидродинамической неустойчивости, характерные для АПС, что проявляется во взаимной ориентации возникающей валиковой циркуляции и геострофического ветра, а также в масштабах и пространственных периодах структур. С увеличением числа Рейнольдса растут средняя энергия и спиральность, в диапазоне чисел Рейнольдса 200–300 зависимость близка к линейной. Отмечается рост асимметрии валиков, сопровождающийся заметным увеличением экстремальных значений амплитуды продольной компоненты скорости в направлении, противоположном направлению геострофического ветра, по сравнению с амплитудами по направлению ветра. Одновременно с увеличением числа Рейнольдса наблюдается увеличение экстремальных значений положительной компоненты спиральности по сравнению с отрицательными.

Проводится качественное сравнение с характеристиками когерентных структур, измеренных методами акустического зондирования в АПС в Калмыкии, в июле 2007 года, где также наблюдается асимметрия в распределении продольной компоненты скорости. Получено неплохое соответствие результатов численного моделирования в негидростатической мезомасштабной модели WRF с наблюдаемым пространственным распределением циркуляционных движений.

Анализ многолетней климатической изменчивости с помощью метода нелинейных мод

А. С. Гаврилов, Д. Н. Мухин, Е. М. Лоскутов, А. М. Фейгин
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В настоящее время при исследовании климатической системы Земли доступные инструментальные данные представляют собой временные ряды, измеренные с высоким пространственным разрешением и содержащие в распределенном виде информацию о динамике системы на различных масштабах. Поэтому подходы, основанные на эмпирическом моделировании, позволяющем извлечь информацию напрямую из наблюдаемых данных, становятся все более актуальными при исследовании климата Земли. Основной задачей при таком моделировании является поиск небольшого количества переменных (мод), описывающих существенную часть динамики системы при наименьшей потере информации. Недавние результаты показывают [1, 2], что метод нелинейных динамических мод (НДМ) способен эффективно решать эту задачу, позволяя представить исходную систему в виде набора подсистем с отличающимися пространственными и временными масштабами.

В данной работе метод НДМ обобщен таким образом, чтобы более адекватно учесть возможное взаимное влияние подсистем друг на друга. На примере данных реанализа поверхностной температуры океана демонстрируется улучшение эффективности НДМ при таком обобщении и грубость получаемых НДМ по отношению к методу реанализа.

Также будет представлен результат применения НДМ к временному ряду поверхностной температуры океана за период с 1850 по 2014 год. В частности, будет показано, что НДМ позволяют наблюдать эволюцию Тихоокеанского декадного колебания в XX веке.

Работа выполнена при поддержке правительства Российской Федерации (соглашение № 14.Z50.31.0033 с институтом прикладной физики РАН).

Литература

1. *Mukhin D., Gavrilov A., Feigin A., Loskutov E., Kurths J.* Principal nonlinear dynamical modes of climate variability // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. 15510. <http://doi.org/10.1038/srep15510>.
2. *Gavrilov A., Mukhin D., Loskutov E., Volodin E., Feigin A., Kurths J.* Method for reconstructing nonlinear modes with adaptive structure from multidimensional data // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2016. V. 26 (12). 123101. <http://doi.org/10.1063/1.49688523>.

Влияние внутренних гравитационных волн на развитие турбулентности в устойчиво-стратифицированном атмосферном пограничном слое

Д. В. Зайцева

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

Параметризация турбулентного обмена в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (АПС) имеет важное значение для численных моделей как АПС, так и всей атмосферы [1]. В многочисленных теоретических работах и лабораторных экспериментах показано, что, как обрушение внутренних гравитационных волн, так и их взаимодействие со средним потоком приводят к увеличению уровня турбулентности. В то же время, натурных количественных данных о влиянии волн на интенсивность турбулентности в устойчивом АПС немного [напр. 2].

Для оценки воздействия волн на турбулентность в устойчивом АПС нами были рассмотрены 8 эпизодов волновой активности, зафиксированных при помощи многочастотного доплеровского трёхкомпонентного содара, разработанного в Институте физики атмосферы РАН [3] в летнее время на Цимлянской научной станции ИФА РАН в 2015 году. Рассмотренные волновые цуги включали в себя 7 эпизодов внутренних гравитационно-сдвиговых волн (ВГСВ) и 1 эпизод волн плавучести (ВП). Для каждого эпизода были рассчитаны временные ходы структурного температурного параметра C_T^2 и среднеквадратичного отклонения вертикальной скорости ветра σ_w , а также вертикальные потоки тепла и импульса. Величины этих характеристик турбулентности сравнивались для трёх смежных периодов: до, во время и после прохождения волнового цуга.

При прохождении цугов ВГСВ изменения C_T^2 и вертикальных потоков были незначительны по сравнению с изменениями, вызванными прохождением цуга типа ВП. Полученные данные позволяют предположить, что степень влияния волнового цуга на турбулентность в устойчиво стратифицированном АПС зависит от типа волны.

Литература

1. *Holtslag A. A. M., Svensson G., Baas P. et al.* Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: challenges for weather and climate models // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2013. V. 94. P. 1691–1706.
2. *Blumen W., Banta R., Burns S. et al.* Turbulence statistics of a Kelvin-Helmholtz billow event observed in the nighttime boundary layer during the Cooperative Atmospheric-Surface Exchange Study field program // *Dynam. Atmos. Oceans.* 2001. V. 34. P. 189–204.
3. *Kouznetsov R. D.* The multi-frequency sodar with high temporal resolution *Meteorologische Zeitschrift.* 2009. V. 18 (2). P. 169–73.

Особенности постановки граничных условий в кинематических моделях турбулентного переноса

А. А. Прохорчук, С. В. Галиченко, С. В. Анисимов
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Кинематические модели турбулентного переноса, используемые, в частности, для решения ряда задач атмосферного электричества, обладают преимуществами по сравнению с традиционными подходами [1–3]. Реализация граничных условий в этих моделях отличается от постановки граничных условий в теории дифференциальных уравнений [2, 4].

В докладе представлены результаты моделирования турбулентного переноса изотопов радона при неоднородном и однородном вертикальных распределениях энергетических и статистических параметров турбулентности. Рассмотрены особенности постановки и алгоритмической реализации граничных условий. Для вертикального профиля активности радона получено аналитическое решение параболического уравнения с зависящим от высоты коэффициентом турбулентной диффузии, соответствующим распределением турбулентных параметров, которое использовалось в лагранжевой стохастической модели турбулентной дисперсии.

Проведено сравнение высотных профилей объемной активности радона в приземном слое атмосферы, рассчитанных на основе кинематических моделей турбулентного переноса (модели случайных смещений и лагранжевой стохастической модели) с аналитическими решениями краевой задачи стационарного уравнения диффузии при различных вариантах постановки граничных условий на поверхности земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-17-10209).

Литература

1. Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017. № 1. С. 155–170.
2. Thomson D. J., Physick W. L., Maryon R. H. Treatment of interfaces in random walk dispersion models // Journal of Applied Meteorology. 1997. V. 36. P. 1284–1295.
3. Ditlevsen O. D. Stochastic models for atmospheric particle dispersion // Probabilistic Engineering Mechanics. 2003. V. 18. № 2. P. 97–106.
4. North E. W., Hood R. R., Chao S.-Y., Sanford L. P. Using a random displacement model to simulate turbulent particle motion in a baroclinic frontal zone: A new implementation scheme and model performance tests // Journal of Marine Systems. 2006. V. 60. P. 365–380.

Эмпирическое прогнозирование изменчивости Эль-Ниньо с использованием метода нелинейных динамических мод

А. Ф. Селезнев, А. С. Гаврилов, Д. Н. Мухин, Е. М. Лоскутов, А. М. Фейгин
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Эмпирический подход к моделированию и прогнозу изменчивости климатической системы Земли приобретает все большую актуальность. В первую очередь, это связано с обилием данных наблюдений, представляющих собой временные ряды различных климатических характеристик, измеряемые с высокой точностью по всему Земному шару.

Ранее авторами был развит эмпирический подход к прогнозу изменчивости сложных систем, основанный на построении нелинейной модели оператора эволюции напрямую по наблюдаемым данным [1]. Наиболее важной задачей при таком подходе является построение набора переменных модели («вложения») таким образом, чтобы они наиболее эффективно отражали ключевые свойства наблюдаемой динамики. Эта задача нетривиальна по причине огромной размерности доступных временных рядов. В данной работе для конструирования вложения используются как традиционная техника разложения данных по базису эмпирических ортогональных функций, так и предложенный недавно метод нелинейных динамических мод [2–3].

Подход применен к задаче моделирования региональной климатической системы — явления Эль-Ниньо. Проводится сравнительный анализ эффективности эмпирических моделей, построенных с использованием рядов различных климатических характеристик: поверхностной температуры океана, давления на уровне моря, глубины изотермического слоя океана, содержания тепла в приповерхностном слое океана, зональной компоненты скорости ветра.

Работа выполнена при поддержке правительства Российской Федерации (соглашение № 14.Z50.31.0033 с институтом прикладной физики РАН).

Литература

1. *Mukhin D., Kondrashov D., Loskutov E., Gavrillov A., Feigin A., Ghil M.* Predicting Critical Transitions in ENSO models. Part II: Spatially Dependent Models // *Journal of Climate*. 2015. V. 28 (5). P. 1962–1976.
2. *Mukhin D., Gavrillov A., Feigin A., Loskutov E., Kurths J.* Principal nonlinear dynamical modes of climate variability // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. 15510.
3. *Gavrillov A., Mukhin D., Loskutov E., Volodin E., Feigin A., Kurths J.* Method for reconstructing nonlinear modes with adaptive structure from multidimensional data // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2016. V. 26 (12). 123101.

Региональные источники тропосферного озона в Северной Евразии

Ю. А. Штабкин, К. Б. Моисеенко

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

Проведено исследование влияния климатически значимых региональных природных и антропогенных источников атмосферного загрязнения на фотохимическую генерацию озона в нижней тропосфере на территории Северной Евразии. С помощью транспортно-химической модели GEOS-Chem проведены количественные оценки чувствительности химической системы нижней тропосферы к выбросам антропогенного NO_x и биогенных летучих органических соединений (ЛОС) с последовательным уменьшением эмиссий от обоих типов источников на 50% и 100%. Установлено, что изменение скорости генерации озона за счет региональных антропогенных выбросов NO_x приводит к существенному (до 20 ppbv в теплый период, до -5 ppbv в холодный период) изменению концентрации озона вблизи земной поверхности в средних широтах вдоль оси трансграничного шлейфа загрязненного воздуха, прослеживаемого до $\sim 120^\circ$ в.д. В то же время, антропогенные эмиссии NO_x не оказывают заметного влияния на режим генерации озона, смена которого происходит преимущественно вследствие действия климатических и сезонных факторов, таких как сезонные изменения температуры, освещенности и приземного содержания ЛОС.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ № 16-35-00158 и проекту РНФ № 14-47-00049.

**ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В АТМОСФЕРЕ.
ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**

Электричество невозмущенного атмосферного пограничного слоя средних широт

С. В. Галиченко, С. В. Анисимов

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Атмосферный пограничный слой (АПС) — результат взаимодействия свободной атмосферы и поверхности земли. АПС сильно турбулентная и наиболее динамичная часть нижней тропосферы, в значительной степени ответственная за вертикальный атмосферный транспорт, формирование облачности, погоды и климата. Атмосферные электрические процессы и явления в АПС, а также их многочисленные связи с метеорологическими условиями и поведением климатической системы в целом заслуживают пристального внимания [1–5].

В докладе представлены результаты моделирования суточной вариации высотных профилей объемной активности радона, торона и их короткоживущих дочерних продуктов, интенсивности ионообразования, атмосферных электрической проводимости, электрического поля и плотности тока в невозмущенном АПС над сушей средних широт в зависимости от вариации ионосферного потенциала, скорости эмиссии радона и торона, высотного распределения атмосферного аэрозоля в диапазоне диаметров частиц 100 нм — 25 мкм, высоты и режима устойчивости АПС. Параметризация модели выполнена с использованием результатов натуральных геофизических наблюдений величин, характеризующих термодинамическое и турбулентное состояние АПС, распределение аэрозольных частиц по размерам. В ходе полевых натуральных наземных и аэростатных наблюдений получены результаты, характеризующие суточную вариабельность объемной активности радона, электрической проводимости, плотности объемного заряда, напряженности поля и плотности тока проводимости. Проведено сравнение результатов моделирования и натуральных полевых наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-17-10209).

Литература

1. *Williams E., Mareev E. A.* Recent progress on the global electrical circuit // *Atmos. Res.* 2014. V. 135–136. P. 155–174.
2. *Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N. M.* Space charge and aereoelectric flows in the exchange layer: an experimental and numerical study // *Atmos. Res.* 2014. V. 135–136, P. 244–254.
3. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Шихова Н. М., Афиногенов К. В.* Электричество конвективного атмосферного пограничного слоя: натурные наблюдения и численное моделирование // *Физика атмосферы и океана.* 2014. Т. 50. № 4. С. 445–454.

4. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017. № 1. С. 155–170.
5. *Anisimov S. V., Galichenko S. V., Mareev E. A.* Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer // Atmos. Res. 2017. V. 194. P. 119–129.

Ионизация в приземной атмосфере

Э. М. Дмитриев

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Ионизация атмосферы формирует ее проводимость, обеспечивая возможность протекания электрических токов. В нижней тропосфере молекулы воздуха ионизируются преимущественно в процессе взаимодействия с α -частицами [1, 2]. В единичном акте ионизации нейтральной молекулы α -частицей образуются положительный молекулярный ион и электрон, который за время $\sim 10^{-7}$ с присоединяется к нейтральной молекуле воздуха, образуя отрицательный молекулярный ион. Молекулярные ионы за время $\sim 10^{-6}$ с гидратируются превращаясь в долгоживущие заряженные молекулярные комплексы — легкие аэроионы.

Основными ионизирующими факторами, порождающими α -частицы, являются космические лучи, излучение радиоактивных веществ земной коры, радиоактивность эксхалирующих в атмосферу из грунта изотопов радона и их дочерних продуктов. В приземной атмосфере (до высот ~ 10 м) при расчете суммарной скорости ионизации необходимо учитывать вклад всех ионизирующих факторов.

Вклад космических лучей в скорость ионизации приземного слоя слабо зависит от высоты [3]. Вклад радиоактивного излучения грунта в скорость ионизации атмосферы складывается из вкладов отдельных радионуклидов, для каждого из которых скорости ионизации аппроксимируется экспоненциальной зависимостью от высоты. Параметры аппроксимации при этом определяются плотностью, пористостью, влажностью грунта и соотношением удельных активностей радионуклидов, содержащихся в приповерхностном слое грунта [4].

Наиболее переменный ионизирующий фактор приземной атмосферы — радиоактивность изотопов радона и их дочерних продуктов. Наряду с вариациями скорости эксхалиции радона на динамику его высотных профилей влияет стратификация атмосферного пограничного слоя, условия перемешивания и наличие облачности [5]. Формирование высотных профилей активности радона и его дочерних продуктов в приземном слое традиционно описывается моделями их турбулентного переноса в атмосфере [6, 7], в том числе учитывающими перенос радона в грунте [8, 9]. В последнее время развито описание турбулентного транспорта атмосферного радона на основе численной лагранжевой стохастической модели [10].

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-01242) и РНФ (№ 16-17-10209).

Литература

1. *Смирнов В. В.* Ионизация в тропосфере. / С.-Пб.: Гидрометеоздат. 1992. 312 С.

2. *Hoppel W. A., Anderson R. V., Willet J. C.* Atmospheric electricity in the planetary boundary layer // *The Earth's electrical environment*. Washington: Natl. Acad. Press. 1986. P. 149–165.
3. *Bazilevskaya G. A. et al.* Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 149–173.
4. *Зукау В. В., Яковлева В. С., Каратаев В. Д., Нагорский П. М.* Ионизация приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов // *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 317. № 2. С. 171–175.
5. *Williams A. G. et al.* The vertical distribution of radon in clear and cloudy daytime terrestrial boundary layers // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 68. P. 155–174.
6. *Jacobi W., Andre K.* The Vertical Distribution of Radon 222, Radon 220 and Their Decay Products in the Atmosphere // *J. of Geophys. Res.*, 1963, V. 68, № 13, P. 3799–3814.
7. *Iordanov D.* On the Stationary Vertical Distribution of a Weightless Radioactive Substance in the Surface Air Layer // *Arch. Met. Geoph. Biokl.* 1968. A.17. P.246–250.
8. *Паровик Р. И.* Нелокальная модель диффузии-адвекции радона в системе грунт-атмосфера // *Мат. моделирование*. 2010. Т. 22. № 9. С. 95–106.
9. *Яковлева В. С., Нагорский П. М., Черепнев М. С.* Формирование α -, β - и γ -полей приземной атмосферы природными атмосферными радионуклидами // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2014. № 1 (8). С. 86–96.
10. *Анисимов С. В., Галиченко С. В., Афиногенов К. В., Макрушин А. П., Шихова Н. М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 155–170.

Лабораторное моделирование высотных разрядов

А. А. Евтушенко, А. В. Стриковский, М. Е. Гуцин, С. В. Коробков

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В натуральных экспериментах традиционная проблема — это организация систематизированных измерений, особенно для такого непредсказуемого и с трудом локализуемого явления как высотный разряд в атмосфере. Для поиска и анализа высотных разрядов привлекаются спутниковые, наземные, самолетные наблюдения в оптическом, инфракрасном, рентгеновском, ультрафиолетовом диапазонах, а также электромагнитные измерения, преимущественно – низкочастотные, которые весьма дороги и трудоемки. Поэтому с точки зрения объяснения естественных разрядных явлений значительный интерес представляет лабораторное моделирование, осуществляемое на относительно небольших по размерам установках. В лабораторных условиях можно воспроизвести структурные особенности разрядов в атмосфере и общие закономерности в развитии разряда с сохранением некоторых безразмерных количественных параметров, таких как, например, приведенное электрическое поле. На наш взгляд, для адекватного моделирования высотных разрядов (спрайтов и джетов), важнейшей задачей является создание протяженного градиента плотности в газе пониженного давления, по критериям подобия соответствующего высотам разрядов, и зажигание в таком неоднородном газе «подвешенного» высоковольтного разряда, не искажаемого токами утечки на землю. Такая задача может быть решена на крупномасштабных плазменных установках, размеры которых достаточны для поддержания долгоживущих градиентов давления с перепадом в десятки и даже сотни раз при практически реализуемых скоростях напуска и откачки. С учетом указанных требований в ИПФРАН была создана экспериментальная установка «Спрайт», предназначенная для моделирования разрядов в градиенте давления и, как следствие, с возможностью моделирования высотных разрядов в атмосфере. В докладе будет освещено современное состояние вопросов лабораторного и численного моделирования высотных разрядов и приведены результаты первых экспериментов на экспериментальной установке «Спрайт».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-01182-а.

Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы Земли на прохождение шлейфов вулканических извержений

Р. Р. Акбашев, П. П. Фирстов

Камчатский филиал Единой геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

Электрические процессы в вулканических облаках являются составной частью вулканической деятельности. Вулканические облака (шлейфы) несут мощный электрический заряд, который может регистрироваться приборами наземного базирования. Контролируя градиент потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА) в приземном слое, можно обнаруживать присутствие даже аэрозольных эруптивных облаков насыщенных частицами мелкодисперсного пепла [4, 5].

Большую роль в электризации эруптивных облаков имеет процесс фрагментации (разрушения) магмы [2–4]. Происходит формирование разнополярных зарядов и возникновение вулканических молний различной интенсивности. Основными причинами электризации эруптивного облака при фрагментации магмы и формировании эруптивной колонны может быть разная подвижность катионов Na^+ в примесных центрах на поверхности фрагментированных частиц с разной структурой. Разделение пепловых частиц разных размеров в эруптивной колонне и шлейфе, также приводит к пространственному формированию зарядов [2].

В Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН регистрация V' ЭПА ведется в трех пунктах с помощью электростатических флюксометров «ЭФ-4» [1]. Пункт KRM – обсерватория «Карымшина». Пункты KLY (п. Ключи) и KZV (п. Козыревск) расположены в центральной части полуострова Камчатка.

Вулкан Шивелуч самый северный из действующих вулканов Камчатки ($56^{\circ}47'$ с.ш., $157^{\circ}56'$ в.д.) с высотой экстрезивного купола 2500 м н. у. м. В последние десятилетия его извержение, обусловленное медленным выжиманием магмы и формированием экстрезивного купола, периодически сопровождается сильными пепловыми эксплозиями.

16 ноября 2014 г. в 10:17 на в. Шивелуч произошло эксплозивное извержение с высотой эруптивного облака – 13000 м н. у. м. В пункте KZV (п. Козыревск), расположенном в 110 км к юго-западу спустя ~ 2 ч на записи V' ЭПА зарегистрирована положительная аномалия длительностью 1,5 ч (рис. а). Положительное возмущение, по времени совпадало с прохождением эруптивного шлейфа в 20 км от KZV, что было отмечено данными полученными со спутниковых снимков и ветровой стратификации атмосферы.

16 декабря 2016 г в 22:31 на в. Шивелуч произошло эксплозивное извержение. На основании записи сейсмического сигнала высота эруптивного облака оценивается в 5600 м н. у. м. Спустя ~ 2 ч в п. Ключи, расположен-

ного южнее в 48 км от в. Шивелуч по азимуту 30° , зарегистрирован пеплопад, интенсивность которого составила 20 г/м^2 . Выпадения пепла в п. Ключи сопровождалось резким уменьшением V' ЭПА, значение которого в пике составило -1230 В/м и длительностью примерно 45 мин. (рис. б). Такой отклик V' ЭПА свидетельствует о том, что пепловое облако, представленное мелкой фракцией, несло мощный отрицательный заряд.

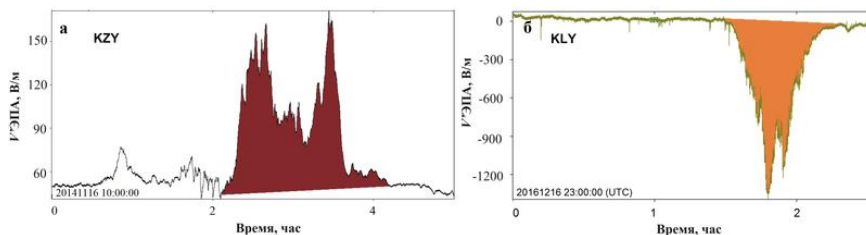


Рис. Отклик V' ЭПА на прохождение эруптивного облака 16.11.2014 г. вблизи KZY (а), отклик в V' ЭПА на пеплопад 16.12.2016 г. в п. Ключи (б).

Регистрация электрических процессов в эруптивных облаках должна быть одной из составляющих мониторинга эксплозивных извержений с целью оценки пепловой опасности для авиатранспорта. Кроме того, по мнению авторов, наземные измерения V' ЭПА под вулканическими шлейфами в ближней зоне (до 500 км) могут использоваться для оценок объёмов легкой фракции вулканического пепла, что до сих является проблемным вопросом.

Литература

1. Ефимов В. А., Орешкин Д. М., Фирстов П. П., Акбашев Р. Р. Применение электростатического флюксметра «ЭФ-4» для исследований геодинамических процессов // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 4. С. 14–24.
2. Руленко О. П. Экспериментальное исследование электризации вулканических облаков. Автореферат на соис. уч. ст. к.ф.-м.н. Санкт-Петербург. 1994. С. 16.
3. James M. R., Lane S. J., Gilbert J. S. Volcanic plume monitoring using atmospheric electrical potential gradients // J. Geol. Soc. London. 1998. № 155. P. 587–590
4. Mather T. A., Harrison R. G. Electrification of volcanic plumes // Serv Geophys. 2006. V. 37. P. 387–432/ DOI 10/1007/s10712-006-9007-2.
5. Shevtsov B. M., Firstov P. P., Cherneva N. V., Holzworth R. H., Akbashev R. R. Lightning and electrical activity during the Shiveluch volcano eruption on 16 November 2014 // Nat. Hazard Earth Syst. Sci. 2016, V. 16, P. 871–874, doi:10.5194/nhessd-16-871-2016.

Численное моделирование двунаправленного лидера

А. А. Булатов, Д. И. Иудин

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

В основе современного понимания макроскопических процессов, происходящих при развитии молниевых разрядов, лежит концепция развития двунаправленного лидера. С противоположных концов разряда развиваются соответственно положительный и отрицательный лидеры, распространяя тем самым область разряда вдоль электрического поля.

Разработанная численная модель является развитием работы [1]. В основе модели лежит представление проводящих структур разряда в виде динамического графа, вложенного в трехмерное пространство. Вершинам и ребрам графа соответствуют определенные параметры и динамические переменные. Моделируются как непрерывная эволюция динамических переменных, так и бифуркации, связанные с возникновением или исчезновением элементов графа.

Ключевыми особенностями модели являются отсутствие сетки, вероятностное ветвление разряда в непрерывный диапазон углов, учет асимметрии развития положительных и отрицательных стримеров, моделирование развития стримерно-лидерного перехода за счет параметризации ионизационно-перегревной неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 16-17-00132).

Литература

1. *Iudin D. I., Rakov V. A., Mareev E. A., Davydenko S. S., Iudin F. D., Syssoev A. A.* Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type // *J. Geophys Res.* 2016JD026261R.

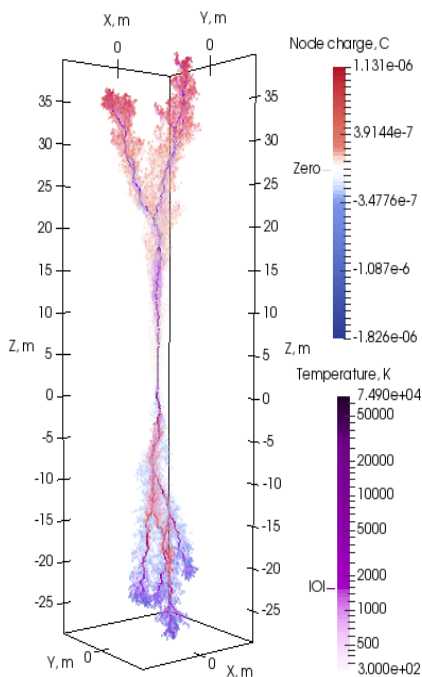


Рис. Результат моделирования инициации молнии.

Динамика токов зарядки в грозовом облаке и их учет в численном прогнозе реальных конвективных событий

С. О. Дементьева, Е. А. Мареев

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Множество природных явлений, таких как грозы, снежные и пылевые бури, извержения вулканов, сопровождаются переносом заряда при столкновении частиц и ростом крупномасштабного электрического поля. Достигая высоких значений, электрическое поле инициирует разряды. Чаще всего электризация имеет место в потоках газа (воздуха) с высоким уровнем турбулентности, однако роль турбулентности в данных явлениях до сих пор недостаточно изучена. Включение турбулентности в численные модели грозовой электризации могло бы содействовать пониманию проблемы инициации молнии.

Как правило, электрическое поле возникает в слабопроводящей среде, содержащей несколько типов гидрометеоров или/и аэрозольных частиц, сталкивающихся друг с другом. Для электризации грозовых облаков необходимо присутствие как минимум двух классов гидрометеоров с различными свойствами. Такими частицами в грозовом облаке являются снежная крупа размером 0,4–4 мм и льдинки размером 10–100 мкм. В данной работе не рассматривается всё многообразие механизмов зарядки частиц, описанных в литературе; вместо этого механизмы разделены на два класса — индукционные и безындукционные. Электрический заряд, переносимый за соударение, зависит от напряженности электрического поля при индукционной зарядке и не зависит — при безындукционной зарядке. Турбулентная диффузия пространственного заряда включена в некоторые численные модели грозового облака, но обычно она играет деструктивную роль в генерации электрического заряда. Тем не менее, перемешивая аэрозольные частицы, турбулентность вызывает флуктуации относительной скорости частиц с различными массами, что существенно сказывается на процессах электризации. В данной работе проводится анализ роли турбулентности в грозовой электризации для индукционного и безындукционного механизмов зарядки, который будет полезен для понимания физических процессов, играющих первостепенную роль в грозовой электродинамике, и дальнейшего их включения в численные модели электризации облаков.

Предложенный в данной работе метод позволяет достаточно легко оценить роль турбулентности в электризации грозовых облаков с помощью разработанной модели генерации и роста крупномасштабного электрического поля в слабопроводящей среде, содержащей два типа частиц с различными физическими свойствами. Обнаружено, что в случае индукционного механизма существует область параметров грозового облака, при ко-

торых наблюдается экспоненциальный рост крупномасштабного электрического поля при достаточно низкой проводимости среды и достаточно сильной электризации, определяемой интенсивностью турбулентности и размерами частиц. Также наблюдается линейный рост напряженности электрического поля, обусловленный безындукционным разделением заряда, который определяется добавкой к среднему значению тока зарядки за счет интенсивных флуктуаций заряда. Для небольших грозовых облаков безындукционная турбулентная зарядка не велика и играет вспомогательную роль в грозовой электризации, но может проявить себя в системах, находящихся в состоянии, близком к порогу пробоя. Для крупных кучево-дождевых облаков турбулентная компонента может достигать 27% от постоянной составляющей.

На данный момент большой интерес представляет прогноз опасных быстроразвивающихся явлений в атмосфере с помощью различных численных моделей. В течение многих лет прогноз молниевой активности был основан на анализе косвенных (температурных, ветровых, влажностных) метеорологических индексов. Однако, как показали работы по прогнозированию электрических атмосферных явлений, электрические процессы, являющиеся неотъемлемой частью динамики (в частности, электродинамики) атмосферы, не могут быть корректно описаны косвенными методами. Для улучшения прогноза грозовых событий на основе существующих численных моделей был разработан модуль расчета электрических параметров, использующий данные численной модели высокого разрешения Weather Research and Forecasting, но, в отличие от данной модели, учитывающий процессы электризации твердых гидрометеоров. Данный модуль использует предположения о переносе заряда гидрометеорами в твердой фазе, безындукционным механизме разделения заряда, пропорциональности плотности зарядов твердых гидрометеоров их массе в единичном объеме воздуха, а также о смене знака заряда на больших и маленьких частицах при переходе через точку реверса. Применив разработанный метод к реальным грозам в Нижегородской области, была продемонстрирована возможность прогнозирования грозовых событий на базе рассчитанных электрических полей и разности потенциалов. Данный подход повысил точность определения грозоопасных районов по сравнению с косвенными методами. С целью дальнейшего увеличения точности описания процессов электризации в разработанной параметризации путем введения поправочных коэффициентов, отвечающих турбулентным компонентам тока зарядки, учтен вклад турбулентности в грозовую электризацию.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 16-17-00132).

Дипольное электромагнитное излучение заряженной капли, осциллирующей во внешнем однородном электростатическом поле

Н. Ю. Колбнева

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль

Вопросы, связанные с наличием электромагнитного излучения от осциллирующих облачных и дождевых капель, представляют интерес в связи с проблемами радиолокационного зондирования метеорологических объектов.

Целью работы являлись исследование и анализ дипольного электромагнитного излучения от осциллирующей во внешнем поле заряженной капли, обнаруживаемого в расчетах первого порядка малости по отношению радиуса капли к длине излучаемой волны и в расчетах второго порядка малости по отношению амплитуды осцилляций капли к её радиусу.

Капля моделируется в виде системы из разноименных равновеликих точечных индуцированных зарядов, расположенных на оси симметрии капли, и собственного точечного равновеликого заряда в центре масс капли. При осцилляциях поверхности капли ускоренно движущиеся заряды осциллируют и излучают электромагнитные волны. Причём осцилляции индуцированных зарядов будут происходить в противофазе друг относительно друга (центры будут сближаться и удаляться).

Приведена физическая постановка задачи. Математическая формулировка задачи состоит из основных линеаризованных уравнений электрогидродинамики. Задача решается, полагая, что поля скоростей течения жидкости имеют порядок малости, что и волновое капиллярное искажение. В задаче имеются два малых параметра: безразмерная амплитуда осцилляций ϵ и эксцентриситет e равновесной поверхности капли. Искомые величины разложены по порядкам малости безразмерной амплитуды осцилляций. Решая задачу нулевого порядка по ϵ , получили форму равновесной поверхности капли, совпадающую с уравнением вытянутого сфероида в линейном приближении по квадрату эксцентриситета. Решая задачу в первом приближении по ϵ , получили форму возмущенной поверхности капли с точностью до слагаемых порядка $\sim \epsilon e^2$.

Аналитическим асимптотическим методом получена интенсивность дипольного электромагнитного излучения осциллирующей заряженной капли в однородном электростатическом поле как сумма интенсивностей излучения от ускоренно движущихся индуцированных и собственного зарядов капли.

Обнаружено, что индуцированные заряды генерируют дипольное электромагнитное излучение в расчетах первого порядка малости по безразмер-

ной амплитуде осцилляций и квадрату эксцентриситета. Интенсивность дипольного излучения от собственного заряда капли получена в расчетах второго порядка малости по безразмерной амплитуде осцилляций и первого порядка малости по квадрату эксцентриситета (в линейном приближении по безразмерной амплитуде осцилляций дипольное излучение не обнаруживается). Следовательно, что полная интенсивность излучения, генерируемого собственным зарядом капли, определена в основном квадрупольной компонентой в расчетах первого порядка малости по ϵ и дипольной составляющей — в расчетах второго порядка по ϵ . Для интенсивности излучения, генерируемого индуцированными зарядами, дипольная составляющая прослеживается уже в расчетах первого порядка малости по ϵ .

Проведены оценки интенсивности дипольного электромагнитного излучения для единичной незаряженной капли во внешнем поле и грозового облака диаметром 5 км. Показано, что из двух возможных источников излучения первый, связанный с осцилляциями низких мод мелких капелек размером от 3 мкм до 30 мкм, имеет большую интенсивность, чем второй, связанный с осцилляциями высоких мод крупных капель (гидрометеоров) размером 100 мкм.

Моделирование прямых и обратных взаимосвязей между атмосферным электричеством, температурой и составом атмосферы в региональном и глобальном масштабах

Л. И. Коломеец, С. П. Смышляев

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Важным непереходным источником окислов азота являются грозовые разряды, влияющие на химические и конвективные подсеточные процессы, протекающие в верхней тропосфере и стратосфере.

Для изучения особенностей прямых и обратных связей между грозовой активностью, составом атмосферы, температурным режимом, используются численная гидродинамическая региональная модель *The Weather Research and Forecasting model* (WRF-Chem), версия 3.6 и глобальная транспортная модель состава/качества воздуха атмосферы. Для расчета молниевой продукции окислов азота используется параметризация Price и Rind (PR92, PR94). Основной задачей данной параметризации является прогноз временного и пространственного распределения отдельных грозовых вспышек без использования дополнительной сложной электрической схемы [2]. Вертикальное распределение количества молниевых вспышек соответствует Гауссовому распределению. Для проверки гипотезы о значимости обратных связей между молниевой активностью, газовым составом и температурой атмосферы в региональном масштабе был выбран регион побережья Черного моря.

В настоящей работе используется химическая схема RADM2, которая включает в себя неорганические и органические соединения. Неорганические соединения представлены 14 устойчивыми видами, 4 реакционноспособными промежуточными соединениями и 3 устойчивыми соединениями (кислород, азот и водяной пар). Атмосферные органические соединения представлены 26 устойчивыми видами и 16 пероксильными радикалами.

В настоящей работе разработана методика исследования эффектов молниевой активности на состав и структуру тропосферы и нижней стратосферы в региональном масштабе.

- Выявлены прямые и обратные связи между атмосферным электричеством, структурой и составом атмосферного воздуха в тропосфере/стратосфере.

- Получены оценки влияния молниевых вспышек на изменение полей температуры в тропосфере/ стратосфере в региональном масштабе.

- Рассчитаны значения изменений значений индексов конвективной неустойчивости атмосферы при учете дополнительных источников окислов азота молниевое происхождения, CAPE, CIN.

На основании численных экспериментов с моделью численного прогноза погоды / качества воздуха показана важность правильного учета пространственного распределения продуктов грозовых разрядов, поскольку от этого существенно зависит эффект, оказываемый атмосферным электричеством на прогноз конвективного состояния атмосферы. Удаленные от поверхности источники молниевоего происхождения окислов азота вносят существенный вклад в результаты моделирования не только основных параметров атмосферы, такие как температура, газовый состав, но и в значительной степени влияют на прогноз энергии неустойчивости атмосферы. Это говорит о том, что правильный учет эффектов атмосферного электричества в значимой мере влияет и на краткосрочный прогноз погоды, и на расчет долгопериодных климатических трендов.

Литература

1. *Lawrence M. G., Chameides W. L., Kasibhalta P. S., Levy II, H., Moxim W. J.* Lightning and atmospheric chemistry: The rate of atmospheric NO production // in Handbook of Atmospheric Electrodynamics, CRC Press. 1995. V. 1. P. 189–202.
2. *Wang Y., DeSilva A. W., Goldenbaum G. C., Dickerson R. R.* Nitric oxide production by simulated lightning: Dependence on current, energy, and pressure // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, № D15. P. 19,149–19,159, doi:10.1029/98JD01356.

Влияние солнечной активности на электрические параметры атмосферы

А. В. Крашенинников, В. А. Рыбаков, С. П. Соловьев
Институт динамики геосфер РАН, Москва

Изменение солнечной активности приводит к вариации скорости космического ветра, появлению вспышечных потоков солнечных космических лучей и возмущениям межпланетного магнитного поля. Потоки солнечных космических лучей изменяют характер ионизации атмосферы. Изменения профиля проводимости приводят к усилению атмосферного электрического поля на высотах 15 км и ниже, где формируется облачность и происходит электризация облаков, а изменение сопротивления воздушного столба над грозowymi генераторами глобальной электрической цепи приводит к изменению разности потенциалов между поверхностью Земли и ионосферой. Эти процессы оказывают влияние на атмосферное электрическое поле и ток проводимости.

В Геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» ведутся непрерывные измерения напряженности электрического поля и тока проводимости, а также наблюдения за метеоусловиями. Солнечные вспышки приводят к кратковременным возмущениям в напряженности электрического поля колебательного типа [1], а также к длительному повышению величин напряженности электрического поля и тока проводимости [2, 3].

Литература

1. *Поклад Ю. В., Рыбаков В. А., Гаврилов Б. Г., Ермак В. М., Крашенинников А. В., Ряховский И. А., Соловьев С. П.* Влияние солнечных рентгеновских вспышек на изменения атмосферного электрического поля и распространение волн СДВ-диапазона // Динамические процессы в геосферах. Выпуск 7: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2015. С. 161–167.
2. *Sartor D.* Electric field perturbations in terrestrial clouds and Solar flare events // Monthly weather review 1980. V. 108. P. 499–505.
3. *Cobb W.E.* Evidence of a Solar influence on the atmospheric electric elements at Mauna Loa observatory // Monthly weather review 1967. V. 95. P. 905–911.

Волны на поверхности объемно заряженной цилиндрической струи диэлектрической непроводящей жидкости, движущейся в материальной среде.

Г. Е. Михеев

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль

Электрогидродинамические неустойчивости заряженной поверхности жидкости, на финальной стадии которых на поверхности жидкости образуются эмиссионные выступы и из их вершин происходит выброс струй, распадающихся на отдельные капли, широко используются в научном приборостроении, технике и технологии. В частности, сказанное относится к электрогидродинамической неустойчивости заряженных струй [1–6].

Рассматривается движущаяся вдоль оси OZ с постоянной скоростью U цилиндрическая радиуса R бесконечная струя идеальной несжимаемой диэлектрической жидкости с массовой плотностью ρ_1 , диэлектрической проницаемостью ϵ_1 . Окружающее струю пространство, будем считать идеальной несжимаемой диэлектрической жидкостью, с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 и массовой плотностью ρ_2 . Коэффициент межфазного натяжения обозначим σ . В рамках модели «вмороженного» заряда примем, что струя заряжена с постоянной объёмной плотностью μ . Напряжённость электрического поля в струе будет $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t)$, в среде — $\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t)$.

При аналитических исследованиях устойчивости неосесимметричных капиллярных волн на поверхности объёмно заряженной цилиндрической струи идеальной несжимаемой диэлектрической жидкости, движущейся относительно идеальной несжимаемой диэлектрической среды найдены условия реализации неустойчивости волн с азимутальными числами один и два, что соответствует возбуждению изгибных и изгибно-деформационных волн. Показано, что из-за тангенциального скачка поля скоростей на поверхности струи, для осесимметричных волн происходит реализация неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца на границе раздела сред. Линейные размеры диапазонов волновых чисел неустойчивых волн и величины инкрементов неустойчивости определяются значениями зарядового параметра и параметра Вебера. Варьирование диэлектрических проницаемостей струи и среды оказывает влияние на характеристики волновых движений, в том числе и в области реализации неустойчивости.

Оказалось, что неустойчивые изгибные и изгибно-деформационные волны в зависимости от физических характеристик системы возбуждаются качественно сходным образом. Неустойчивость изгибных волн имеет порог по скорости движения и не имеет по величине заряда, а неустойчивость изгибно-деформационных волн имеет пороги как по скорости, так и по заряду.

Само движение струи относительно среды приводит к тому, что неустойчивость волн является периодической.

Литература

1. *Fenn J. B., Mann M., Meng C. K. et al.* Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules // *Science*. 1989, V. 246 № 4926. P. 64–71.
2. *Cloupeau M., Prunet Foch B.* Electrostatic spraying of liquids: main functioning modes. *J Electrostatics*. 1990. V. 25. P. 165–184.
3. *Shiryayeva S. O., Grigor'ev A. I.* The semifenomenological classification of the modes of electrostatic dispersion of liquids // *J. Electrostatics*. 1995. V. 34. P. 51–59.
4. *Jaworek A., Krupa A.* Classification of the Modes of EHD Spraying // *J. Aerosol. Sci.* 1999. V. 30 № 7. P. 873–893.
5. *Eggers J.* Physics of Liquid Jet // *Rep. Prog. Phys.* 2008. V. 71. № 036, P. 1–79.
6. *Жакин А. И.* Электрогидродинамика заряженных поверхностей // *УФН*. 2013. Т. 183. № 2. С. 153–177.

Об одном свойстве неустойчивости Кельвина-Гельмгольца

А. А. Очиров, Д. Ф. Белоножко

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль

Известно, что внутренние волны в стратифицированной жидкости могут возникать вследствие относительного потенциального движения слоев жидкости с различной плотностью с некоторой постоянной скоростью. Такого рода возмущение вызывают неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Настоящая работа посвящена исследованию характера движения жидких частиц в процессе реализации этой неустойчивости. Построена аналитическая модель расчета циклических и дрейфовых составляющих движения индивидуальных жидких частиц, находящихся по разные стороны границы раздела двух слоев стратифицированной жидкости, участвующих в относительном потенциальном движении со скоростью U_0 . Предложенная модель является обобщением метода, представленного в [1]. В настоящем исследовании произведен учет относительного дрейфа жидких частиц во втором порядке малости по амплитуде волнового движения. Развита методика позволяет получать траектории движения частиц, устанавливая правила преобразования аналитических выражений для перехода от эйлеровой формы поля скоростей к переменным Лагранжа, действуя только аналитическими манипуляциями. Полученные результаты свидетельствуют о том, что относительная сдвиговая скорость оказывает заметное влияние на форму траекторий движения индивидуальных частиц как в движущейся, так и неподвижной жидкости. Показано, что использование эйлеровых переменных более предпочтительно для описания движения идеальных жидкостей, поскольку в случае использования переменных Лагранжа запись граничных условий на границе раздела двух жидких слоев оказывается далеко нетривиальной самостоятельной задачей. Были построены выражения, позволяющие рассчитать скорость среднего дрейфового движения обоих слоев жидкости при докритическом значении тангенциального скачка скорости на начальных этапах неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

Используемая методика расчета подразумевает малость амплитуды волнового движения по сравнению с длиной волны. В условиях развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца циклическая частота волнового движения $\omega = \sigma + ir$ — комплексная величина в связи с этим амплитуда волнового движения A экспоненциально растет с течением времени и система быстро выходит за пределы применимости модели, однако развитая модель все равно позволяет судить о тенденциях поведения дрейфового движения на начальных этапах развития неустойчивости. Показано, что скорость добавочного дрейфового движения жидких частиц, вызванное волновым возмущением и пропорциональное A^2 , на начальном этапе развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в верхнем и нижнем слоях жид-

кости направлено в противоположные стороны. Это означает, что начальная стадия развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца проявляется не только в росте амплитуды волнового искажения границы раздела, но и в возникновении в обеих средах экспоненциально нарастающих со временем скоростей встречных по отношению друг к другу дрейфовых течений. В нижней среде нарастает дрейфовое течение, направленное вдоль направления сноса верхней среды, в которой в свою очередь перенос со скоростью U_0 ослабляется «встречным противодрейфом». Получается, что в начале развития неустойчивости встречные нижнее и верхнее дрейфовые течения эволюционируют таким образом, чтобы с течением времени уменьшить величину тангенциального скачка относительной скорости сред на их границе. Таким образом, уже на начальном этапе развития неустойчивости запускается механизм ее ослабления — уменьшения величины дестабилизирующего границу тангенциального скачка скорости. При этом искажение границы раздела растет со временем пропорционально $\sim A \exp(rt)$, а скорость встречных дрейфовых потоков, стремящихся сократить тангенциальный скачок скорости, нарастет быстрее: $\sim A^2 \exp(2rt)$.

Методика рассмотрена для модели идеальных полубесконечных жидкостей, однако она может быть использована и в более сложных ситуациях. Интересно, что даже в простом идеализированном случае удалось получить интересные результаты и выявить новые свойства хорошо известных гидродинамических течений. В частности, благодаря анализу движения отдельных материальных частиц обнаружилось новое свойство классической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Установлено, что она проявляет себя не только в нарастании искажения границы раздела двух смещающихся относительно друг друга сред, но и в появлении усиливающихся со временем встречных приповерхностных дрейфовых течений, стремящихся сократить величину тангенциального скачка скорости, спровоцировавшего неустойчивость.

Литература

1. *Белоножко Д. Ф., Очиров А. А.* О поведении жидких частиц, участвующих в волновом движении границы раздела двух движущихся несмешивающихся жидкостей // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2016. № 6. 166804 (4с.).

Моделирование механизма ступенчатого развития отрицательного лидера молнии

А. А. Сысоев¹, Д. И. Иудин^{1,2}, С. С. Давыденко^{1,2}, В. А. Раков^{1,3}

¹ Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород

³ Университет Флориды, Гейнсвилл, США.

Уже около сотни лет назад было замечено, что отрицательный лидер, в отличие от положительного, развивается ступенчатым образом, прирастая за счет так называемых пространственных лидеров [1]. Причины данной асимметрии и сама физика процесса появления новой ступени отрицательного лидера до сих пор не ясны.

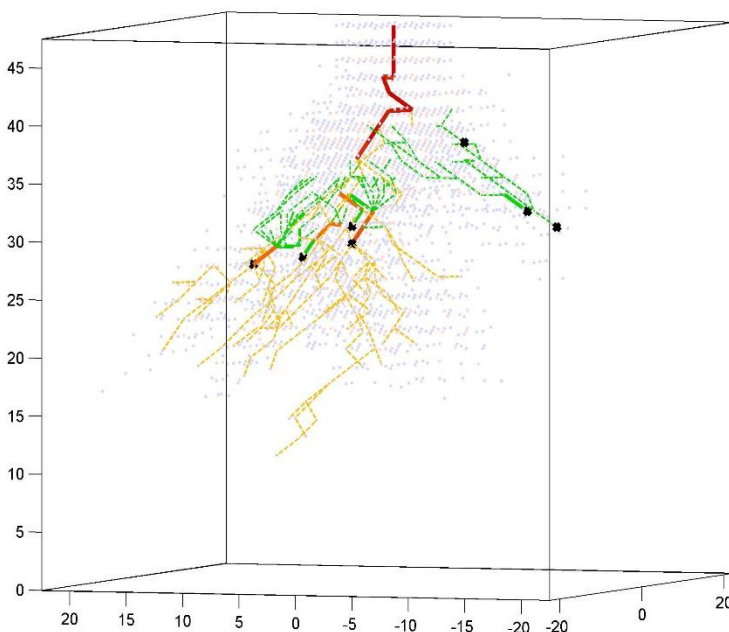


Рис. Мгновенный снимок модельного разрядного дерева. Красные и оранжевые сплошные каналы относятся к отрицательному и пространственным лидерам, проводимость которых превышает пороговое значение стримерно-лидерного перехода $\sigma_{th} = 10^3$ С/м, соответственно; желтые и зеленые пунктирные каналы обозначают стримеры стримерной зоны отрицательного лидера и положительные пространственные стримеры соответственно. Жирные черные точки символизируют источники пространственных стримеров/лидеров — стемы; голубые и розовые точки обозначают отрицательные и положительные заряды чехла модельного лидера соответственно.

В данной работе впервые, насколько известно авторам, было проведено моделирование развития ступенчатого отрицательного лидера, учитывающее процессы возникновения пространственных стримеров и их последующей трансформации в объемные лидеры. В основу модели положены вероятностный подход, учет асимметрии характерных полей развития положительных и отрицательных стримеров, а также рассмотрение временной эволюции проводимости и напряженности электрического поля разрядных каналов.

Сравнение результатов моделирования с наиболее содержательными на настоящий момент данными высокоскоростной съемки процесса ступенчатого развития отрицательного лидера молнии [2–3] позволяет говорить о высокой степени сходства не только морфологии, но и основных параметров ступеней модельного и реального молниевых разрядов.

Литература

1. *Schonland B. F. J.* The Lightning discharge // *Handbuch der Physik*. 1956. V. 22. P. 576–628.
2. *Petersen D. A., Beasley W. H.* High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader // *JGR: Atmospheres*. 2013. V. 118. P. 12,110–12,119.
3. *Qi Q., Lu W., et al.* High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance // *Atmos. Res.* 2016. V. 178–179. P. 260–267.

Неустойчивость осцилляций поверхности заряженной капли в неоднородном электростатическом поле стержня

А. А. Ширяев, А. И. Григорьев

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль

Поведение заряженной капли во внешнем электрическом поле представляет интерес для понимания механизмов образования заряженных частиц в грозовых облаках. Влияние неоднородности поля так же может оказывать существенное влияние на устойчивость капель.

В работе рассматривается заряженная капля радиуса R идеальной, идеально проводящей жидкости с плотностью ρ и коэффициентом поверхностного натяжения σ , несущую собственный заряд Q и находящейся во внешнем неоднородном электрическом поле. Поле создаётся заряженным стержнем длиной $2a$ и диаметром $2b$, поддерживаемого при постоянном потенциале ϕ_0 и расположенным рядом с каплей так, что центр масс капли находится на линии оси стержня на расстоянии L от одного из его концов. Задача решается в предположении потенциального течения жидкости и безразмеривается на характерные масштабы $R = \rho = \sigma = 1$. Используется осесимметричная постановка, значительно упрощающая выкладки, при это существенно снижая общность рассуждений. Соотношения между характерными геометрическими размерами вводятся следующие: $b \sim R$, $L \sim R$, $a \gg R$. Решение задачи проводится в сферической системе координат, связанной с точкой центра масс капли. Предполагается, что смещение центра масс заряженной капли в электрическом поле за характерные времена реализации неустойчивости капли незначительно.

Форма поверхности капли ищется в виде суперпозиции сферической формы, стационарной деформации поверхности капли $h(\theta)$ и волнового возмущения $\xi(\theta, t)$, которые представляются в виде разложений по полиномам Лежандра.

Исследование проводится в нелинейном приближении по комбинации двух малых параметров — безразмерной амплитуде осцилляций капли $\xi(\theta, t)$ и малой величины стационарной деформации капли $h(\theta)$.

Внешнее поля стержня моделируется полем с потенциалом Φ_r заряженного вытянутого сфероида с полуосями a и b . Потенциал представляется в виде разложений по полиномам Лежандра. Численные оценки коэффициентов разложений показали, что при сохранении относительной ошибки приближения $< 1\%$, достаточно учитывать двенадцать слагаемых в разложении.

Получены выражения для критических значений потенциала стержня ϕ_{cr} . В случае разноимённых зарядов на капле и стержне критические значения потенциала несколько ниже, что можно объяснить более высокой поверхностной плотностью заряда в точке поверхности, обращённой к концу

стержня. Увеличение толщины стержня приводит к существенному снижению ϕ_{cr} .

Проанализированы характеристики осцилляций при возбуждении в начальный момент времени основной (второй) моды осцилляций. Получено, что амплитуды и периоды колебаний связанных мод, возбуждающихся одновременно с изначально возбуждённой увеличиваются с ростом толщины стержня. Превышение критических условий для изначально возбуждённой моды приводит к одновременному росту амплитуд осцилляций всего спектра связанных мод.

Найдена аналитическая кривая (рис.) для критических условий реализации неустойчивости капли, показывающая предельные по величине комбинации полевого $W = Q^2/4\pi$ и зарядового $w = E_0^2/16\pi$ параметров, где E_0 — напряжённость поля стержня в точке центра масс капли.

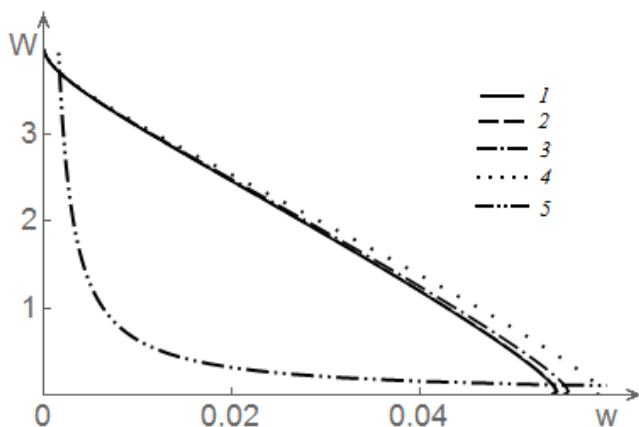


Рис. Критическая зависимость значения параметра W от величины полевого параметра w : $a = 10$, $L = 2$, $b = 0.1$ (1), 0.3 (2), 1 (3), 2 (4); заряды стержня и капли одного знака; пунктирная линия (2) сливается со сплошной (1); 5 — граница области применимости предположения о малом смещении центра масс капли за время развития её неустойчивости.

Анализ данной зависимости показал, что большая неоднородность поля приводит к снижению критических условий реализации неустойчивости капли и сильнее проявляется для капель в сильных полях.

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Р. Р. Акбашев	65	Н. В. Ильин	46
М. Г. Акперов	48	Д. И. Иудин	67, 79
М. А. Алимпиева	8	Г. В. Карпов	6
С. В. Анисимов	10, 12, 16, 56, 60	А. С. Козьмина	16
К. В. Афиногенов	10, 12	Н. Ю. Колбнева	70
Г. Ф. Батраков	17	Л. И. Коломеец	72
М. В. Беликович	47, 49	С. В. Коробков	64
Д. Ф. Белоножко	77	А. В. Крашенинников	74
Е. В. Березина	50	Д. А. Кременчуцкий	17
А. А. Булатов	67	М. Ю. Куликов	47, 49
Н. А. Важнова	52	Ф. А. Кутерин	18
Н. В. Вазаева	53	Е. М. Лоскутов	54, 57
Е. С. Васильев	6	Л. О. Максименков	53
Е. М. Володин	24, 35	Е. А. Мареев	29, 68
В. В. Воробьева	35	С. А. Маслов	14
А. С. Гаврилов	54, 57	Ю. П. Михайловский	22
С. В. Галиченко	10, 16, 56, 60	Г. Е. Михеев	75
А. В. Глазунов	25, 39	К. Б. Моисеенко	58
Г. С. Гойман	37	И. И. Морозов	6
В. П. Горбатенко	19	Е. В. Мортиков	25
М. Е. Горбунов	44	И. И. Мохов	48
А. И. Григорьев	81	Д. Н. Мухин	54, 57
А. С. Грицун	27, 39	А. А. Нечаев	47
А. В. Гурьев	12	О. Е. Нечепуренко	19
М. Е. Гуцин	64	А. А. Очиров	77
С. С. Давыденко	79	П. А. Пережогин	39
С. О. Дементьева	68	Н. А. Петров	14
Э. М. Дмитриев	12, 62	А. А. Прохорчук	56
А. А. Евтушенко	64	В. А. Раков	79
Е. В. Егоров	14	И. А. Репина	42
Т. С. Ермакова	47, 49	В. А. Рыбаков	74
Д. В. Зайцева	55	А. Ф. Селезнев	57

А. А. Синькевич	22	М. В. Черепова	41
С. П. Смышляев	41, 72	Р. В. Чернышев	42
С. П. Соловьев	74	О. Г. Чхетиани	53
В. М. Степаненко	33, 42	Л. В. Шестакова	53
А. В. Стриковский	64	А. А. Ширяев	81
А. А. Сысоев	79	Ю. В. Шлюгаев	18
Р. Е. Торгунаков	22	Ю. А. Штабкин	58
Р. Ю. Фадеев	34	Е. Cardellach	44
А. М. Фейгин	47, 49, 54, 57	К. В. Lauritsen	44
П. П. Фирстов	65		

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ. АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ.	5
<i>И. И. Морозов, Е. С. Васильев, Г. В. Карпов</i>	
Элементарные химические процессы атмосферной химии	6
<i>М. А. Алимтиева</i>	
Долгосрочный прогноз типов весен для Саратовской области	8
<i>К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, С. В. Галиченко</i>	
Вариабельность электрической проводимости приземной атмосферы средних широт	10
<i>К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, Э. М. Дмитриев, А. В. Гурьев</i>	
Наблюдения аэроэлектричества на геофизической обсерватории «Борок»	12
<i>Е. В. Егоров, С. А. Маслов, Н. А. Петров</i>	
Экспедиционные исследования характеристик ионизации приземного слоя и содержания радона-222 в почве и атмосфере	14
<i>А. С. Козьмина, С. В. Галиченко, С. В. Анисимов</i>	
Объемная активность изотопов радона и статистические параметры приземной турбулентности: влияние кучевой облачности	16
<i>Д. А. Кременчуцкий, Г. Ф. Батраков</i>	
Временная изменчивость концентрации бериллия-7 (⁷ Be) в атмосфере г. Севастополь за период 2011–2016 гг.	17
<i>Ф. А. Кутерин, Ю. В. Шлюгаев</i>	
Исследование рентгеновского излучения, возникающего в экспериментах с длинными искрами	18
<i>О. Е. Нечепуренко, В. П. Горбатенко</i>	
Критерии степени развития опасных конвективных явлений	19
<i>Р. Е. Торгунаков, А. А. Синькевич, Ю. П. Михайловский</i>	
О самолетных измерениях напряженности электрического поля для контроля токов ГАЭЦ	22
МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.	23
<i>Е. М. Володин</i>	
Современные проблемы моделирования климата и его изменений	24
<i>А. В. Глазунов, Е. В. Мортиков</i>	
Численное моделирование геофизической турбулентности	25
<i>А. С. Грицун</i>	
Предсказуемость и чувствительность климатических моделей	27
<i>Е. А. Мареев</i>	
Об энергетике молниевых вспышек и распределении грозовой активности по земному шару	29

<i>В. М. Степаненко</i> Параметризация гидрологических процессов на суше в моделях Земной системы _____	33
<i>Р. Ю. Фадеев</i> Математическое моделирование динамики атмосферы и задача прогноза погоды _____	34
<i>В. В. Воробьева, Е. М. Володин</i> Исследование главных мод естественной изменчивости в климатической модели ИВМ РАН _____	35
<i>Г. С. Гойман</i> Реализация параллельного алгоритма решения эллиптических уравнений в глобальной модели атмосферы _____	37
<i>П. А. Пережогин, А. В. Глазунов, А. С. Грицун</i> Исследование влияния численных схем и подсеточных параметризаций на статистические характеристики моделируемой двумерной турбулентности _____	39
<i>М. В. Черепова, С. П. Смышляев</i> Модельное прогнозирование эволюции концентрации газов в арктических районах _____	41
<i>Р. В. Чернышев, В. М. Степаненко, И. А. Репина</i> Моделирование ледникового ветра и его валидация над ледником Консвеген (Шпицберген) _____	42
ДИАГНОСТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ	
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ. _____	
<i>М. Е. Горбунов, E. Cardellach, K. B. Lauritsen</i> Фильтрация волновых полей в фазовом пространстве: приложение к задаче выделения отраженного луча _____	44
<i>Н. В. Ильин</i> Машинное обучение в задачах геофизики _____	46
<i>М. Ю. Куликов, М. В. Беликович, Т. С. Ермакова, А. А. Нечаев, А. М. Фейгин</i> Непрямые методы определения распределений малых газовых составляющих мезосферы с помощью фотохимических моделей _____	47
<i>М. Г. Акперов, И. И. Мохов</i> Изменчивость циклонической активности в Арктическом регионе по данным реанализа и модельным расчетам _____	48
<i>М. В. Беликович, М. Ю. Куликов, Т. С. Ермакова, А. М. Фейгин</i> Трёхмерное моделирование средней атмосферы для анализа возможности применения условия фотохимического равновесия мезосферного озона в обработке спутниковых данных _____	49
<i>Е. В. Березина</i> Некоторые аспекты влияния глобального потепления на состав приземного воздуха _____	50
<i>Н. А. Важнова</i> Долгосрочные прогнозы продолжительности отопительного периода для территории Приволжского федерального округа _____	52

<i>Н. В. Вазаева, О. Г. Чхетиани, Л. В. Шестакова, Л. О. Максименков</i> Мезомасштабная циркуляция в атмосферном пограничном слое: наблюдения и моделирование _____	53
<i>А. С. Гаврилов, Д. Н. Мухин, Е. М. Лоскутов, А. М. Фейгин</i> Анализ многолетней климатической изменчивости с помощью метода нелинейных мод _____	54
<i>Д. В. Зайцева</i> Влияние внутренних гравитационных волн на развитие турбулентности в устойчиво-стратифицированном атмосферном пограничном слое _____	55
<i>А. А. Прохорчук, С. В. Галиченко, С. В. Анисимов</i> Особенности постановки граничных условий в кинематических моделях турбулентного переноса _____	56
<i>А. Ф. Селезнев, А. С. Гаврилов, Д. Н. Мухин, Е. М. Лоскутов, А. М. Фейгин</i> Эмпирическое прогнозирование изменчивости Эль-Ниньо с использованием метода нелинейных динамических мод _____	57
<i>Ю. А. Штабкин, К. Б. Моисеенко</i> Региональные источники тропосферного озона в северной Евразии _____	58
ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ.	
ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ. _____	59
<i>С. В. Галиченко, С. В. Анисимов</i> Электричество невозмущенного атмосферного пограничного слоя средних широт _____	60
<i>Э. М. Дмитриев</i> Ионизация в приземной атмосфере _____	62
<i>А. А. Евтушенко, А. В. Стриковский, М. Е. Гуцин, С. В. Коробков</i> Лабораторное моделирование высотных разрядов _____	64
<i>Р. Р. Акбашев, П. П. Фирстов</i> Отклик градиента потенциала электрического поля атмосферы Земли на прохождение шлейфов вулканических извержений _____	65
<i>А. А. Булатов, Д. И. Иудин</i> Численное моделирование двунаправленного лидера _____	67
<i>С. О. Дементьева, Е. А. Мареев</i> Динамика токов зарядки в грозовом облаке и их учет в численном прогнозе реальных конвективных событий _____	68
<i>Н. Ю. Колбнева</i> Дипольное электромагнитное излучение заряженной капли, осциллирующей во внешнем однородном электростатическом поле _____	70
<i>Л. И. Коломеец, С. П. Смьшляев</i> Моделирование прямых и обратных взаимосвязей между атмосферным электричеством, температурой и составом атмосферы в региональном и глобальном масштабах _____	72
<i>А. В. Крашенинников, В. А. Рыбаков, С. П. Соловьев</i> Влияние солнечной активности на электрические параметры атмосферы _____	74

Г. Е. Михеев

Волны на поверхности заряженной цилиндрической струи диэлектрической
непроводящей жидкости, движущейся в материальной среде _____ 75

А. А. Очиров, Д. Ф. Белоножко

Об одном свойстве неустойчивости Кельвина-Гельмгольца _____ 77

А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, С. С. Давыденко, В. А. Раков

Моделирование механизма ступенчатого развития
отрицательного лидера молнии _____ 79

А. А. Ширяев, А. И. Григорьев

Неустойчивость осцилляций поверхности заряженной капли
в неоднородном электростатическом поле стержня _____ 81

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ _____ 83

Научное издание

**СОСТАВ АТМОСФЕРЫ
АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

*Тезисы докладов
XXI Всероссийской школы-конференции
молодых ученых*

Редактор, корректор
Э.М. Дмитриев

Оригинал-макет подготовлен в ГО «Борок» ИФЗ РАН
152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 142.

Подписано в печать 24.05.17. Формат 90x60 1/16.
Усл. печ. л. 7. Заказ № 17092. Тираж 70 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Филигрань».
150049 г. Ярославль, ул. Свободы, д. 91.
pechataet@bk.ru