Международная конференция,
посвященная памяти академика А. М. Обухова

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

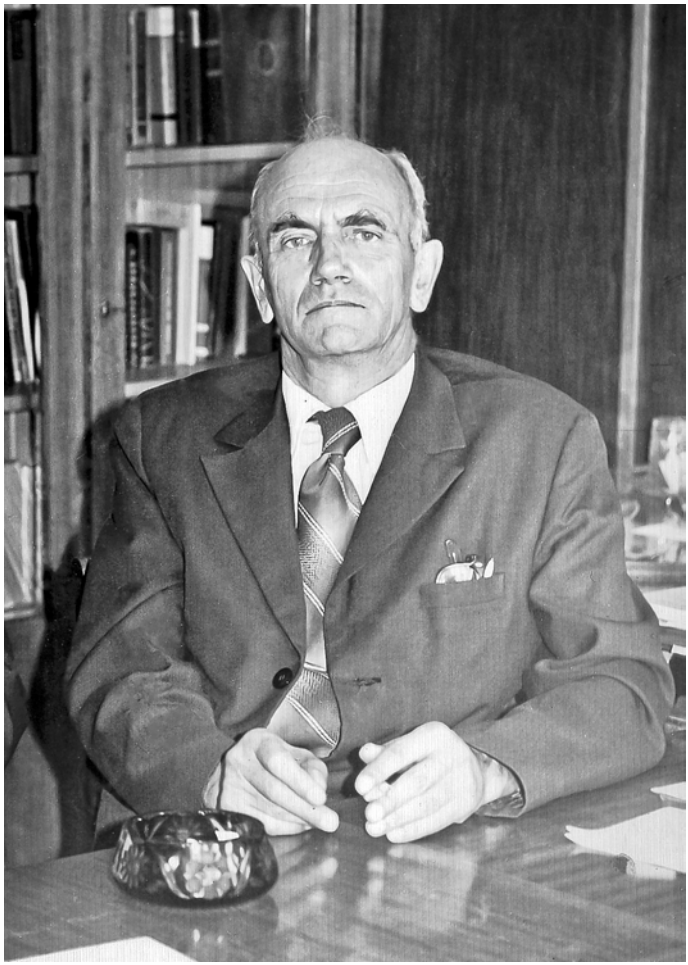
Тезисы докладов

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

TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS

Abstracts

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Москва, 13 - 16 мая 2013



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

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

**Международная конференция,
посвященная памяти
академика А. М. Обухова**

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

13-16 мая 2013 года
Сборник тезисов

•

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

TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS

13-16 May 2013
Abstracts

МОСКВА
ГЕОС
2013

УДК 551.5, 532.5
ББК 26.323
Т 72

Редколлегия:
Г.С. Голицын, И.И. Мохов, С.Н. Куличков, М.В. Курганский, О.Г. Чхетиани, А.В. Чернокульский

Международная конференция, посвященная памяти академика А.М. Обухова “ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА”. 13-16 мая 2013 года Сборник тезисов докладов. М.: ГЕОС, 2013. 247 с.
ISBN 978-5-89118-625-5

The International Conference dedicated to the memory of academician A.M.Obukhov “TURBULENCE, ATMOSPHERE AND CLIMATE DYNAMICS”. 13-16 May 2013. Abstracts. Moscow, GEOS, 2013. 247 p.

© Авторы, 2013
© ИФА РАН, 2013
© ГЕОС, 2013

Программный комитет конференции:

- Г.С.Голицын (сопредседатель), академик РАН, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН;
- И.И.Мохов (сопредседатель), член-корреспондент РАН, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН;
- Г.И.Баренблатт, профессор, Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН;
- А.С.Гурвич, д.ф.-м.н., Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН;
- В.П.Дымников, академик РАН, Институт вычислительной математики РАН;
- Н.Ф.Еланский, член-корреспондент РАН, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН;
- С.С.Зилитинкевич, професссор, Финский метеорологический институт; Каллистратова М.А., д.ф.-м.н., Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН; Кислов А.В., профессор, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова;
- С.Н.Куличков, д.ф.-м.н., Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН;
- В.Е.Куницын, профессор, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова;
- М.В.Курганский, профессор, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН; Лыкосов В.Н., член-корреспондент РАН, Институт вычислительной математики РАН;
- Р.И.Нигматулин, академик РАН, Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН;
- А.А.Саркисян, академик РАН, Институт вычислительной математики РАН;
- А.В.Фролов, Росгидромет;
- Ю.Д.Чашечкин, д.ф.-м.н., Институт проблем механики им. Ю.Л.Ишлинского РАН; Чхетиани О.Г., д.ф.-м.н., Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН

Организационный комитет конференции:

- С.Н.Куличков – председатель, д.ф.-м.н., зам. директора ИФА им. А.М.Обухова РАН
- А.Ю.Артамонов (ИФА им. А.М.Обухова РАН)
- М.С.Артамонова (ИФА им. А.М.Обухова РАН)
- М.В.Курганский , д.ф.-м.н. (ИФА им. А.М.Обухова РАН)
- О.Г.Чхетиани , д.ф.-м.н. (ИФА им. А.М.Обухова РАН)
- А.В. Чернокульский, к.ф.-м.н. (ИФА им. А.М.Обухова РАН) – отв. секретарь
- В.А. Фалалеева (ИФА им. А.М.Обухова РАН)
- Е.И.Фёдорова (ИФА им. А.М.Обухова РАН)

Конференция организована при поддержке Президиума Российской Академии Наук и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 13-05-06016-г).

АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ ОБУХОВ – УЧЁНЫЙ, ОСНОВАТЕЛЬ ИФА

Александр Михайлович Обухов (5 мая 1918 – 3 декабря 1989) – выдающийся учёный современности, создатель вместе с Андреем Николаевичем Колмогоровым теории мелкомасштабной турбулентности, определившей ход многих отраслей науки о природных явлениях и технической гидродинамики в XX веке и до нашего времени. Он был аспирантом А.Н.Колмогорова, и об этом периоде его жизни рассказывается в докладе профессора Г.И. Баренблатта. Но развитие научных интересов каждого настоящего учёного определяется и кругом его общения. С конца 1930-х годов одним из его ближайших друзей был Владимир Александрович Красильников (1912–1997), работавший всю свою жизнь на кафедре акустики физического факультета МГУ. Уже тогда тот занимался распространением звука в атмосфере, актуальной в те годы оборонной задачей. Поэтому ещё до появления летом статьи А.М. Обухова о спектре атмосферной турбулентности за месяц до неё вышла его статья о рассеянии звука в турбулентной среде. Эта тематика была им развита в статье 1953 года, где были предсказаны все эффекты, наблюдавшиеся при распространении, но с модельной корреляционной функцией. Затем его аспирант Валериан Ильич Татарский описал все эти эффекты с использованием спектра турбулентности. Проверка этих выводов на экспериментах в реальной атмосфере блестяще подтвердила эту теорию.

В 1956 г. А.М. Обухов, уже член-корр. АН СССР с 1953 г., был назначен директором-организатором нового Института физики атмосферы. В ИФА был организован ряд лабораторий: атмосферной турбулентности, оптики атмосферы, физики верхней атмосферы, динамической метеорологии. Их руководителям были известные учёные: сам Обухов, профессора Г.В. Розенберг, В.И. Красовский, член-корреспондент И.А. Кибель. Последний через год ушёл в новый Институт прикладной геофизики. Институт быстро рос, появлялась новая тематика и новые направления. Среди них надо отметить космические исследования (В.И. Красовский, И.С. Шкловский, затем А.С. Гурвич), верхней атмосферы и околоземного космического пространства, самой атмосферы (Г.В. Розенберг), потребовавшие развития теории распространения света в аэрозольных и облачных средах, теории радиационного баланса (Е.М. Фейгельсон), формирования собственного излучения атмосферы и под-

стилающей поверхности в микроволновом диапозоне, теории распространения мощного лазерного излучения (Государственная премия 1988 года), изучение взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью, в том числе с океаном. Теория турбулентного пограничного слоя, развитая Мониным и Обуховым, до сих пор является наиболее цитируемой в мире работой по атмосферным наукам, насчитывающей десятки тысяч ссылок. Разрабатывалась новая аппаратура.

Сам А.М. Обухов был одним из самых уважаемых в мире учёных: в 1966 – 1969 годах он был президентом Международной ассоциации метеорологии и физики атмосферы. Гостями ИФА были практически все известные учёные того времени: Сидней Чэпман и Давид Брэнт (Англия), Джул Чарни, Джо Смагоринский, Эд Лоренц (США – все были по два-три раза). Якоб Бьеркнес в 1961 году в ИФА впервые обнародовал свою теорию Эль-Ниньо. Своим умелым и мудрым руководством А.М. Обухов создал Институту высочайший научный престиж в мире, куда приезжали стажёры из США, Германии, Китая и других стран.

Подробнее о роли А.М. Обухова в развитии физики атмосферы будет рассказано в ряде последующих докладов на этой конференции.

Программа конференции включает пленарные доклады ведущих российских ученых, в их числе прямых учеников А.М. Обухова (А.С. Гурвич, М.А. Каллистратова, Б.М. Копров), а также устные и постерные доклады, организованные в рамках 6 отдельных секций:

Секция I «Турбулентность», Секция II «Динамика атмосферы и климатической системы», Секция III «Физика и состав атмосферы», Секция IV «Взаимодествие атмосферы и океана», Секция V «Распространение волн», Секция VI « Геофизическая гидродинамика».

В некоторые из этих разделов атмосферной науки Александр Михайлович внес личный основополагающий вклад, а за развитием других он пристально следил и всячески поддерживал, будучи директором Института физики атмосферы АН СССР и главным редактором журнала «Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана».

Мы надеемся, что представленные на конференции доклады были бы интересны самому Александру Михайловичу – если бы ему довелось их услышать – и что они дают отчетливое представление о современном состоянии и тенденциях развития атмосферной науки в нашей стране и за рубежом.

Г.С. Голицын

I. Турбулентность

ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Коняев П.А., Копылов Е.А.
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, lukin@iao.ru

В качестве измерительного прибора использовался корреляционный датчик Шэка-Гартмана, созданный для адаптивной оптической системы Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) [1], а измеряемыми величинами - локальные наклоны волнового фронта (ВФ) излучения, падающего на входную апертуру телескопа. При работе адаптивной системы в режиме с разомкнутой обратной связью измерения локальных наклонов ВФ на входных субапертурах телескопа дают возможность оценить радиус Фрида r_0, характеризующий атмосферную турбулентность на пути распространения излучения от исследуемого объекта до входной апертуры телескопа. Использование дифференциального метода измерений [2] позволяет уменьшить ошибку определения r_0, связанную с вибрациями элементов конструкции телескопа. Зная радиус Фрида, можно оценить качество видения телескопа.

При работе датчика волнового фронта могут использоваться изображения различных структур солнечной поверхности – солнечные пятна, поры, грануляционная картина. Оценку радиуса Фрида можно также проводить по измерению смещения небольшого фрагмента изображения края солнечного диска в направлении перпендикулярном линии края. В данной работе представлены результаты измерения радиуса Фрида, полученные при работе корреляционного датчика Шэка-Гартмана по вертикальному в поле зрения датчика краю солнечного диска. Входная апертура телескопа разбивается маской Гартмана на 120 субапертур размером 49.8 x 49.8 мм. Локальные наклоны ВФ вычисляются из измерений смещения изображения участка края солнечного диска размером 15.4 угловых секунд. Угловой размер поля опорного изображения составляет 30.6 x 30.6 угловых секунд. Радиус Фрида рассчитывался из дисперсии разности углов наклона ВФ на двух субапер-

турах, разнесённых по горизонтали на расстояние кратное размеру входной субапертуры.

Измерения локальных наклонов ВФ проводились с частотой 180 кадров в секунду. Время экспозиции кадра – 5.2 мс. Объём реализации – 3000 кадров. Регистрация гартманограммы осуществлялась в узком спектральном диапазоне излучения, выделяемом светофильтром с максимальным пропусканием на $\lambda = 0.535$ мкм и полосой пропускания 0.01 мкм.

Полученные результаты согласуются с оценкой радиуса Фрида [1] из измерений контраста грануляционной картины, которые проводились нами на БСВТ ранее.

1. В.П. Лукин, В.М. Григорьев, Л.В. Антошкин, О.Н. Емалеев, П.А. Коняев, Е.А. Копылов, В.В. Лавринов, П.Г. Ковадло, В.И.Скоморовский *Результаты испытания адаптивной оптической системы с модифицированным корреляционным датчиком на Большом солнечном вакуумном телескопе* // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 5. С. 419-427.
2. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. *Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности*.// Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 11. С. 1219-1223.

ПРОСТЕЙШЕЕ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ - СДВИГОВЫЙ ПОТОК ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА: ИТОГИ И УРОКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Г.И.Баренблатт[1,2], А.Дж.Хорин[2], В.М.Простокиши[1]
[1]Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, v.m.prost@gmail.com
[2] Департамент математики, Калифорнийский университет в Беркли, США

Турбулентность, наряду с усталостью материалов (в широком смысле) представляет собой одну из основных загадок современной прикладной математики и механики. Локальная структура турбулентных потоков при больших числах Рейнольдса - принципиально новая глава учения о турбулентности, связана с именами А.Н.Колмогорова и А.М.Обухова, и структура турбулентных сдвиговых потоков при больших числах Рейнольдса, изучение которой было начато Т. фон Карманом и Л.Прандтлем, - наиболее продвинутые области исследований явления турбулентности. При этом наиболее изученные сдвиговые потоки - потоки в трубе и пристеночный пограничный слой равномерного течения.

В подавляющем большинстве курсов, монографий и учебников структура поля осредненной скорости в основной части цилиндриче-

ской трубы между вязким подслоем и окрестностью оси трубы описывается универсальным (независящим от числа Рейнольдса) логарифмическим законом Кармана-Прандтля. Закон сопротивления описывается неявной формулой Прандтля. Эти результаты основаны на гипотезе, явно сформулированной фон Карманом о независимости течения в указанной промежуточной области от вязкости жидкости (полная автомодельность по параметрам, включающим вязкость).

В цикле работ авторов показано, что это предположение неправильно, и закон Кармана-Прандля не соответствует экспериментальным данным. Выдвинуто альтернативное предположение о "неполной автомодельности" по параметрам подобия, включающим вязкость. Проведенный анализ привел к новым формулам для распределения осредненных скоростей и сопротивления. Результаты сравнения со всеми известными опытными данными обнаружили показательное совпадение. Аналогичные исследования проведены для пограничного слоя и пристенной струи.

Авторы пришли к выводу, что закон Кармана-Прандтля ошибочен и должен быть исключен из преподавания и заменён экспериментально аппробированным новым законом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ОЗОНА И ТЕПЛА В РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ И СЕЗОННЫХ УСЛОВИЯХ

И.Б.Беликов, Р.А.Шумский
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва,
romio@pochta.ru

Как известно, приземный озон является одной из наиболее значимых климатически и химически активных малых газовых примесей атмосферы. Одним из существенных факторов, определяющих вариации его [1]. Сухое осаждение озона является также одним из важных параметров, необходимых для существующих теоретических фотохимических моделей. Эти модели, в свою очередь, обеспечивают прогноз высоких концентраций озона, и, следовательно, качества атмосферного воздуха.

Для экспериментального определения сухого осаждения, как правило, в полевых условиях измеряют турбулентный поток озона на подстилающую поверхность. Для этого, как известно из литературы, разработано несколько методов, самыми распространенными из которых являются т.н. пульсационный и градиентный.

Как следует из обзора литературных данных, различными зарубежными научными организациями в последние годы проводились экспериментальные наблюдения потоков озона, как пульсационным, так и градиентным методами, на различных ландшафтах - леса, сельскохозяйственные и травяные поля и т.п. В ИФА им. А.М. Обухова РАН первые работы по наблюдению турбулентного потока были проведены в 1995 г. Настоящая работа является их продолжением на новом уровне.

Для реализации пульсационного метода была разработана конструкция малогабаритного быстродействующего хемилюминесцентного измерителя концентрации озона [2]. Все узлы этого прибора - реакционная камера с чувствительным элементом и фотоприемником, генератор озона для активации чувствительного элемента, и насос - размещены в отдельных корпусах весьма небольших поперечных размеров. Это обеспечивает минимальные искажения измеряемого турбулентного потока при наблюдениях.

Авторами получен Патент РФ на полезную модель № 113007, с приоритетом от 4 октября 2011 г., на данную конструкцию малогабаритного измерителя концентрации озона.

В конструкции измерителя предусмотрен управляющий микроконтроллер, обеспечивающий управление работой всех узлов измерителя.

Разработанный измеритель имеет существенные преимущества перед зарубежными аналогами, главным образом, возможностью длительной (несколько месяцев) работы в режиме непрерывного мониторинга потока озона, без необходимости технического обслуживания, а также возможностью цифровой синхронизации с акустическим анемометром и иными приборами.

Для полевых наблюдений турбулентного потока озона был собран экспериментальный комплекс. В состав комплекса входили: метеорологическая мачта высотой 6 метров, собственно быстродействующий измеритель концентрации озона, акустический анемометр АЦАТ-3М производства НПО "Тайфун" (г. Обнинск, Россия)) и стандартный газоанализатор озона. Использовались газоанализатор 3.02 П-А производства ООО "ОПТЭК" (г. С Петербург, Россия) и газоанализатор 1008-RS производства компании Dasibi (США). Управление комплексом осуществлялось с помощью персонального компьютера.

Наличие в составе комплекса акустического анемометра обеспечивало также измерения параметров турбулентности атмосферы в приземном слое: потока явного тепла, масштаба Монина - Обухова и характеристической скорости (u*).

С помощью этого комплекса в 2006 - 2008 гг. были проведены наблюдения турбулентных потоков на различных научных станциях, в различные сезоны и в различных ландшафтных условиях.

На Кисловодской научной станции наблюдения проводились в марте 2006 г., в т.ч. во время полного солнечного затмения. Анализ данных наблюдений показывает, в частности, что турбулентный поток озона в ночное время, при устойчивой стратификации приземного слоя атмосферы, характеризуется низкими значениями, возрастающими в дневное время, когда стратификация сменяется на неустойчивую.

На Цимлянской научной станции наблюдения проводились в августе 2006 г. Турбулентный поток озона в течение всех суток отрицателен (направлен вниз). Это соответствует стоку озона на поверхность. В дневное время, при неустойчивой стратификации, величина потока по модулю возрастает. Полученные значения потоков тепла и озона в условиях степной зоны соответствуют литературным данным.

На станции наблюдения состава атмосферы в МГУ наблюдения проводились в летний и осенне-зимний периоды 2007 - 2008 гг. Примененный пульсационный метод позволяет проводить прямые наблюдения турбулентного потока в условиях, когда теория подобия Монина-Обухова не применима, в частности, в условиях городской застройки.

В летний период характер суточных вариаций потока озона подобен ранее рассмотренному для степной зоны, и характеризуется высокими значениями потока в дневное время, и низкими - в ночное. В зимних условиях поток озона характеризуется низкими отрицательными значениями, слабо зависящими от времени суток.

Полевой эксперимент по наблюдению турбулентных потоков тепла и озона одновременно пульсационным и градиентным методами в зимний период был проведен в декабре 2012 г. на участке сельскохозяйственных земель ООО "Шарапово" (Московская область).

На метеорологическую мачту, кроме акустического анемометра и быстродействующего хемилюминесцентного измерителя концентрации озона, монтировались два узла электромагнитных клапанов. Клапаны и измеритель были соединены трубопроводами с отборниками воздуха, расположенными на высотах 0,5, 3 и 6 м, а также непосредственно в зоне измерений акустического анемометра. Описанная конструкция позволяла использовать один и тот же измеритель концентрации озона как для пульсационного, так и для градиентного методов наблюдений турбулентного потока озона. Период наблюдений составлял 30 мин. каждым методом поочередно. Также на высотах 0,5, 3 и 6 м на мачту монтировались прецизионные датчики температуры и влажности воздуха. Все наблюдения были полностью автоматизированы. Передача данных наблюдений для контроля и анализа производилась с помощью GPRS-модема.

Измеренные в процессе эксперимента значения турбулентного потока озона и его сухого осаждения хорошо согласуются с литературными

данными. В дальнейшем планируется развить конструкцию экспериментального комплекса для повышения его надежности и удобства эксплуатации, а также распространить наблюдения на другие научные станции.

1. Wesely M.L., Hicks B.B. *A review of the current status of knowledge on dry deposition* // Atmospheric Environment. 2000. Vol.34. P. 2261-2282.
2. И.Б. Беликов, К.В. Жерников, Л.А. Обвинцева, Р.А. Шумский. *Аппаратура и методика наблюдений турбулентных потоков озона* // Тезисы докладов Всероссийской Конференции "Развитие системы мониторинга состава атмосферы", 16-18 октября 2007 г., Москва. С. 128.

НАБЛЮДАЕМЫЕ НАРУШЕНИЯ ЗАКОНА «2/3» В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СПЕКТРАХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И УСЛОВИЯ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

А.Я. Богушевич
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Томск, bay@imces.ru

При спектральном представлении атмосферной турбулентности принято выделять три характерных интервала: энергетический, инерционный и диссипации. При этом одним из самых фундаментальных результатов в теории атмосферной турбулентности является закон «2/3» Колмогорова-Обухова для инерционного интервала [1]. В соответствии с ним турбулентные флуктуации полей метеорологических величин $\xi(\boldsymbol{r}, t)$ в инерционном интервале описываются структурной функцией $D_\xi(\boldsymbol{r}) = \left\langle \left[\xi(\boldsymbol{r}_1+\boldsymbol{r})-\xi(\boldsymbol{r}_1)\right]^2 \right\rangle$ в виде универсальной степенной зависимости

$$D_\xi(\boldsymbol{r}) = C_\xi^2 r^{2/3}, \qquad (1)$$

где C_ξ^2 - структурная постоянная флуктуаций ξ. Структурная функция в силу связи корреляционных свойств случайного поля с его спектральными распределениями (через преобразования Фурье) напрямую определяет также и их вид. При этом вследствие (1) пространственная (трехмерная) спектральная плотность $\Phi_\xi(\chi)$ должна зависеть в инерционном интервале от аргумента $\chi=1/r$ пропорционально $\chi^{-11/3}$, а энергетический (частотный) спектр $E(f) \sim f^{-5/3}$, где f – частота в Гц.

Проводилось множество экспериментальных исследований частотных спектров турбулентных флуктуаций метеорологических величин

(см., например, [2, 3]). Они позволяли утверждать, что указанная спектральная зависимость при анализе по периоду в 10 мин соблюдается в реальной атмосфере с точностью порядка 5 %. Однако почти все эти исследования проводились в районах с умеренным климатом, преимущественно в теплый период года и, как правило, в условиях достаточно развитой турбулентности. В то же время автор данной работы при использовании им ультразвуковых термоанемометров в Сибири на протяжении многих лет замечал, что в условиях зимнего антициклона для температурных флуктуаций часто возникают отклонения от закона «2/3», достигающие 30-40 % (при этом для ветровых флуктуаций они по-прежнему почти укладывались в упомянутые 5 %). Подобное явление также иногда обнаруживалось при летнем антициклоне, но только на короткий период развития ночной температурной инверсии.

В данной работе приводятся численные и графические результаты по исследованию зависимости $E(f) \sim f^{-\beta}$ в условиях зимнего и летнего антициклона в г. Томске, когда при наличии температурной инверсии наблюдалось энергетическое «вырождение» атмосферной турбулентности, сопровождаемое отклонениями от закона «2/3» для температурных флуктуаций. В первом случае (январь 2010 г.) на протяжении почти месяца имел место устойчивый зимний антициклон с температурами от -40 до -30 ^{0}С и с высоким атмосферным давлением (иногда до 780 мм.рт.ст.). Во втором случае (июнь 2009 г.) развитая дневная конвенция чередовалась с ночными приземными температурными инверсиями.

Для расчетов частотных спектров использовались данные измерений ультразвуковой метеостанции АМК–03 [4], имеющей следующие характеристики: инерционность измерений – около 10^{-3} с, частота измерений – 80 Гц, разрешение по температуре и скорости ветра – примерно 0,01 ^{0}С и 0,01 м/с. Спектры рассчитывались по 10-минутным реализациям измеренных величин флуктуаций температуры T' и трех ортогональных компонент ветра: продольной (относительно направления горизонтального ветра) u', поперечной v' и вертикальной w'. Каждая временная реализация содержала 48245 точек данных, а вычисляемые спектры имели частотный диапазон от $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ до 40 Гц. В каждом вычисленном спектре оценивались нижняя и верхняя частотные границы инерционного интервала, значение показателя степени β для наклона спектральной кривой в инерционном интервале и его относительное отклонение ε от -5/3 в %, а также параметр нелинейности в логарифмическом масштабе данного участка спектра β_2. Дополнительно к спектрам из тех же реализаций данных вычислялись энергии ветровой E_V и температурной E_T турбулентности, а также значения потока тепла H. Все перечисленные параметры оценивались с интервалом по времени изме-

рений обрабатываемых реализаций в 1 час для 3-х суточных периодов в двух указанных выше синоптических условиях. В итоге были получены следующие результаты.

1. Нижняя частотная граница (между энергетическим и инерционным интервалами) оказалась практически одинаковой как для ветровых флуктуаций u', v' и w', так и для температурных T': при этом ее изменчивость во времени не обнаруживалась. Верхняя частотная граница (между инерционным интервалом и начала диссипации) в спектрах для u', v' и w' варьировалась всегда в диапазоне значений 20 – 35 Гц, в то время как в спектрах для T' она часто оказывалась на порядок меньше, чем для ветровых флуктуаций. Эта частотная граница для ветровых и температурных флуктуаций имела явную изменчивость в течение суток.

2. Все спектры для u', v' и w' в инерционном интервале соответствовали закону «2/3» с отклонениями ε, не превышающими 6-7 %. Часть спектров для T' имела заметные отклонения от этого закона в сторону уменьшения абсолютного значения β. Для зимнего антициклона подобные спектры обычно наблюдались в любое время суток. В них значения ε составляли 30-40 %, уменьшаясь на несколько часов до 20 % после 12 часов дня (обнаруженный максимум ε достиг 46,1 %, т.е. со значением β = -0,9). Для летних условий аномальные спектры были редкими и только в ночное время (обнаруженный максимум ε достиг 24,6 %).

3. Спектры для ветровых флуктуаций u', v' и w' в инерционном интервале имели (в логарифмическом масштабе) для зимних измерений очень линейную зависимость спектральной плотности от частоты (параметр нелинейности β_2 изменялся в диапазоне от 0,003 до 0,1). В то же время аналогичная зависимость в спектрах для T' заметно отклонялась в этот же период от линейной, приближаясь к параболической (при ε = 46,1 % параметр β_2 имел максимум, равный 0,63). В то же время для летних измерений параметр β_2 оказался очень изменчивым и иногда значительным как в спектрах для T', так и в спектрах для продольных компонент ветра u' и v' независимо от значения ε.

4. Экспериментально обнаруживаемое уменьшение абсолютного значения β от классического значения, равного -5/3, совпадало с наличием нисходящего потока тепла H, что соответствовало условиям температурной инверсии в точке измерений. При этом оно имело явную корреляцию с уменьшением энергии температурных флуктуаций E_T и сопровождалось значительным сужением инерционного интервала со стороны границы с интервалом диссипации.

1. Обухов А.М. *Турбулентность и динамика атмосферы*. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1988. 413 с.

2. Гурвич А.С. *Экспериментальное исследование частотных спектров и функций распределения вероятностей вертикальной компоненты скорости ветра* // Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1960. №7. С.1042-1055.
3. Цванг Л.Р. *Некоторые характеристики спектров температурных пульсаций в пограничном слое атмосферы* // Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1963. №10. С.1594-1600.
4. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. *Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03* // Метеорология и гидрология, 2006, № 11, с. 89-97.

ДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНСАМБЛЯ СПОНТАННЫХ СТРУЙ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ МОМЕНТЫ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Вульфсон А.Н.
Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, vulfson@ipng.ru

В поверхностном слое проникающей турбулентной конвекции, расположенном над однородной горизонтальной нагретой поверхностью постоянного потока плавучести gS_θ выделяется ансамбль конвективных термиков, динамические параметры которых удовлетворяют уравнениям спонтанной струи Бэтчелора [1], согласуются с экспериментальными данными [2], [3] и имеют вид

$$\begin{cases} g\hat{\theta} = \dfrac{4}{3}\left(gS_\theta\right)^{2/3} z^{-1/3}, \quad \hat{w} = \left(gS_\theta\right)^{1/3} z^{1/3} \\ R = \eta \overline{R}_a, \quad \overline{R}_a = 0.09\, h\left(z/h\right)^{1/3} \end{cases} \tag{1}$$

Здесь $g\hat{\theta}$, $\hat{w}$ – средние по сечению термика значения плавучести и вертикальной скорости, идентичные для всех восходящих потоков; R – радиус струи; $\overline{R}_a$ – средний радиус струй ансамбля, согласно экспериментальным данным [2], [3]; h – высота конвективного слоя; $\eta = R / \overline{R}_a$ не зависящий от высоты, случайный параметр.

Величина потока плавучести отдельного теплового восходящего потока $q = \pi R^2 g\hat{\theta}\hat{w}$ является случайной величиной т.к. зависит от случайного радиуса термика R. Пусть $\Psi_q\left(q\right) > 0$ – плотность вероятности распределения термиков по потокам плавучести. На классе произ-

вольных гладких функций $\Psi_q(q) > 0$, удовлетворяющих условиям нормировки с фиксированным внешним параметром $< q >$, введем обобщенный функционал энтропии Шеннона

$$S(\Psi_q) = -\int_0^\infty \Psi_q(q) \ln \Psi_q(q) dq \qquad (2)$$

В соответствии с вариационным методом Больцмана-Джейниса [4] будем вычислять равновесную плотность распределения $\Psi_q^0(q)$ исходя из условия максимума функционала энтропии (2) при наличии упомянутых ограничений.

Преобразование $\Psi_q^0(q)$ с учётом (1) позволяет построить равновесную плотность распределения по радиусам $F_R^0(R)$. Сопоставление безразмерной формы плотности распределения термиков по радиусам и экспериментальных данных [5] представлено на рис. 1.

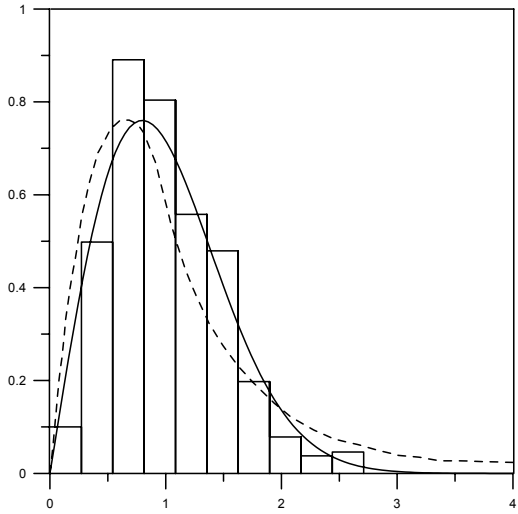


Рис. 1. Сопоставление равновесной и эмпирических плотностей распределения вероятности. Сплошная линия соответствует равновесному распределению. Штриховая линия соответствует эмпирическому распределению [2]. Гистограмма соответствует эмпирическим данным [5].

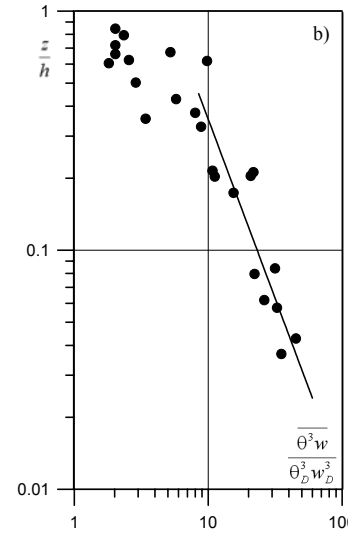


Рис. 2 Зависимость нормированного момента четвертого порядка $\overline{\theta^3 w} / \theta_D^3 w_D$ от нормированной высоты z/h.

Заметим, что форма распределения термиков по радиусам подобна распределениям известным в спектральной теории турбулентности, см. [6], [7].

Показано, что ансамбль термиков, всплывающих в горизонтально однородном окружении, формирует турбулентные моменты приземного конвективного слоя. Сопоставление аналитических соотношений для высших турбулентных моментов вертикальной скорости и температуры с экспериментальными данными [8] представлено на рис. 2.

Результаты, полученные в [4], убедительно демонстрируют эффективность использования методов статистической механики в задачах турбулентной конвекции.

Литература

1. Batchelor J. K. – Heat convection and buoyancy effects in fluids // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1954. V. 80. N. 345. P. 339–358.
2. Вульфсон Н.И. – Исследование конвективных движений в свободной атмосфере. // М. «Изд-во АН СССР» 521 с.
3. Lenschow D. H., and P. L. Stephens – The role of thermals in the convective boundary layer // Boundary–Layer Meteor. 1980. V. 19. N. 4. P. 509–532.
4. Вульфсон А. Н., Бородин О. О. – Вариационный метод Больцмана-Джейниса и распределение термиков по температурам в турбулентном приземном конвективном слое атмосферы. //Известия АН «Физика атмосферы и океана». 2012. Т. 48. N. 6. С. 674–681.
5. Hooper W. P., and James J. E. – Lidar observation of ship spray plumes. // J. Atmos. Sci. 2000. V. 57. N. 16. P. 2649–2655.
6. Kraichnan R. H. – The structure of isotropic turbulence at very high at Reynolds numbers. // J. Fluid Mech. 1959. V. 3. N. 6. P. 497–543.
7. Голицын Г. С. – О структуре турбулентности в области малых масштабов. // ПММ 1960. Т. XXIV. Вып. 6.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

А.В. Глазунов[1,2], *В.П. Дымников*[1], *Д.В. Кулямин*[2], *В.Н. Лыкосов*[1,2]
[1]Институт вычислительной математики РАН, Москва
[2]Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ, Москва
lykossov@yandex.ru, lykossov@inm.ras.ru

Определение ключевых физических процессов и механизмов, ответственных за спектральный перенос кинетической и доступной потенциальной энергии в широком диапазоне пространственных масштабов (от общей циркуляции до мелкомасштабной турбулентности), является

фундаментальной проблемой современной физики атмосферы. Исследование спектральной структуры многомасштабной атмосферной турбулентности удобно проводить на основе использования иерархии математических моделей турбулентности: трехмерной, мезомасштабной и квазидвумерной, соответственно. В докладе представлены некоторые результаты такого рода исследования.

С помощью вихреразрешающей модели исследована термическая конвекция Рэлея-Бенара в двояко-периодическом канале с твердыми стенками как аналог многомасштабной атмосферной турбулентности. "Мезомасштабное" отношение его горизонтальных размеров к вертикальному обеспечило существование квазидвумерных крупномасштабных компонент течения, а размер равномерной расчетной сетки в несколько десятков миллионов узлов дал возможность явно воспроизвести динамику мелкомасштабной трехмерной турбулентной составляющей. Декомпозиция изучаемого турбулентного течения на баротропную и бароклинную составляющие позволила предложить схему преобразований кинетической энергии в данной системе, объясняющую некоторые спектральные свойства наблюдаемой атмосферной турбулентности.

Спектральный анализ результатов расчетов устойчиво стратифицированных турбулентных течений над поверхностями с явно заданными элементами шероховатости позволил выделить характерные масштабы флуктуаций, ответственных за перенос импульса по вертикали. Обнаружено, что спектры дисперсии скорости в коротковолновом диапазоне можно привести к универсальному виду с использованием масштабов, соответствующих локальным значениям масштаба Обухова на заданной высоте. Спектральный диапазон, в котором такая универсальность достигается, соответствует инерционному интервалу с распределением по закону $k^{-5/3}$, где k - горизонтальное волновое число.

По результатам численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН высокого пространственного (1° широте, 1.25° по долготе и 128 уровней по вертикали) получены спектральные распределения кинетической и доступной потенциальной энергии. Они характеризуются тем, что на больших масштабах соответствуют закону k^{-3}, а в мезомасштабной части спектра - распределению $k^{-5/3}$. При этом граница перехода от одного распределения к другому находится вблизи масштаба 1000 км. По сравнению с моделями более грубого разрешения, такое распределение лучше соответствует данным наблюдений. Лучше модель воспроизводит и мезомасштабный интервал атмосферной турбулентности, однако диапазон соответствующих волновых чисел недостаточно широк вследствие все еще довольно грубого разрешения и дефектов описания процессов подсеточного масштаба.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ АЭРОЗОЛЯ НА ОПУСТЫНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Г.И. Горчаков, А.В. Карпов, Д.В. Бунтов, Г.А. Курбатов
Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва, gengor@ifaran.ru

Выносимый в атмосферу с опустыненных территорий минеральный аэрозоль заметно влияет на радиационный режим атмосферы в глобальном масштабе. Однако прямые измерения потоков аэрозоля с опустыненных территорий выполняются очень редко. В докладе представлены результаты измерений турбулентных потоков и скорости выноса аэрозоля с опустыненных территорий в Астраханской области в 2008 – 2012 гг.

Турбулентные потоки аэрозоля определялись по данным синхронных измерений в приземном слое атмосферы флуктуаций дифференциальных счетных концентраций частиц аэрозоля и турбулентных пульсаций вертикальной компоненты скорости ветра. Проанализирована изменчивость режимов турбулентности в периоды измерения турбулентных потоков аэрозоля. Выполнено сопоставление наблюдаемых потоков аэрозоля с потоками тепла.

Получены оценки скорости выноса аэрозоля с подстилающей поверхности.

Выполнены совместные измерения флуктуаций суммарных концентраций сальтирующих песчинок и частиц аэрозоля в приповерхностном слое атмосферы. По данным измерений в заказнике «Пески Берли» получено регрессионное соотношение между концентрациями частиц аэрозоля и сальтирующих песчинок.

ПРОБЛЕМА ЗАМЫКАНИЯ В ТЕОРИИ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Зилитинкевич С.С.
Университет Хельсинки, Финляндия, sergej.zilitinkevich@fmi.fi

Предлагается теория турбулентного замыкания, основанная на уравнениях баланса для главных вторых моментов: кинетической энергии турбулентности (КЭТ), потенциальной энергии турбулентности (ПЭТ), вертикального турбулентного потока количества движения и вертикального турбулентного потока плавучести и включает новое уравнение для турбулентного масштаба времени. Согласно этой теории турбулентность может поддерживаться сдвигом средней скорости ветра при любых значениях градиентного числа Ричардсона Ri и при этом различается два прин-

ципиально разных режима: «сильная турбулентность» при Ri << 1 и «слабая турбулентность» при Ri > 1. В первом из них, характерном для пограничных слоев, турбулентное число Прандтля близко к единице и практически постоянно. Во втором режиме, характерном для свободной атмосферы (и для океана, за исключением придонного и приповерхностного пограничных слоев), возрастает с увеличением Ri асимптотически линейно, так что турбулентный перенос тепла становится значительно менее эффективным, чем перенос количества движения. Для практического использования предлагается иерархия моделей замыкания различной сложности – от алгебраической модели, пригодной для описания равновесного режима турбулентности, до нелокальных замыканий, учитывающих неградиентные турбулентные переносы.

Zilitinkevich, S.S., Elperin, T., Kleeorin, N., Rogachevskii, I., and Esau., I.N. (2012). *A hierarchy of energy- and flux-budget (EFB) turbulence closure models for stably-stratified geophysical flows*. Boundary-Layer Meteorol. doi:10.1007/s10546-012-9768-8.

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ И ВЕТРОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

О.Ф. Капегешева[1], *Н.П. Красненко*[2,3], *П.Г. Стафеев*[2,3]
Л.Г. Шаманаева[4]
[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет;
[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН;
[3]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники;
[4]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН;
Томск, krasnenko@imces.ru

В настоящее время, доплеровские трехкомпонентные моностатические содары широко используются для измерения вертикальных профилей вектора скорости ветра в пограничном слое атмосферы. Из их измерений определяют также вертикальные профили структурных характеристик скорости ветра C_V^2.

Моностатические содары используются и для определения профилей структурных характеристик температуры C_T^2 по интенсивности обратно рассеянного сигнала. Однако, сопоставление содарных данных с данными локальных измерений показало, что расхождение содарных и локальных значений C_T^2 в среднем составляет 40% и может достигать

2-5 раз в зависимости от атмосферных условий, что было объяснено неучетом турбулентного ослабления.

В докладе представлен оригинальный метод акустического зондирования атмосферной турбулентности с учетом турбулентного ослабления [1–3], позволяющий впервые одновременно восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик температуры и скорости ветра и исследовать их взаимосвязь.

На рис. 1 приведены синхронные вертикальные профили структурных характеристик температуры $C_T^2(z)$ и скорости ветра, рассчитанные для вертикального (обозначенные C_{Vz}^2) и горизонтального разноса точек наблюдения (обозначенные C_{Vt}^2) по результатам измерений содаром "Звук-2" с рабочей частотой 1700 Гц в утренние (10 ч, *а* и *б*) и вечерние часы (16 ч, *в* и *г*). Время усреднения 10 минут. Звездочками показаны результаты локальных измерений микропульсационными датчиками.

Рисунок 2, *а–е* иллюстрирует синхронную временную динамику температурной (факсимильная запись сигнала *а, г*) и ветровой турбулентности (*б, д* – поперечная (D_{tt}) и *в, е* продольная (D_{rr}) структурные функции скорости ветра) в нижнем 200-м слое атмосферы в градациях искуственного цвета для двух 10-мин серий измерений минисодаром AV4000 с рабочей частотой 4900 Гц [5]. Обрабатывались данные непрерывных минисодарных измерений в течение 6 суток. Для построения факсимильной записи сигнала (*а*, *г*) для каждых суток измерений, из файла данных брались амплитуды сигнала за 1 час, нормировались по заданному растровому файлу палитры, и распределись по высоте. Для динамического представления, факсимильные записи вычислялись с заданным сдвигом во времени, который в нашем случае составлял 16 секунд. Временные поперечная (*б*, *д*) и продольная (*в*, *е*) структурные функции поля скорости ветра вычислялись по аналогичному алгоритму.

На факсимильных записях отчетливо видна перьевая структура, характерная для условий дневной конвекции, верхняя граница которой подвержена квазипериодическим колебаниям и имеет выраженную тенденцию к увеличению высоты за период наблюдения. Величины поперечной (*б*, *д*) и продольной (*в*, *е*) структурных функций в $м^2/с^2$, в градациях искусственного цвета, указаны справа от рисунков. Видно, что поперечная структурная функция много меньше продольной, что указывает на сильную анизотропию атмосферных флуктуаций в продольном и поперечном направлении и сдавливании мелкомасштабной турбулентности в вертикальном направлении, отмеченном также в [6]. Поведение продольной структурной функции также характеризует динамику высоты слоя перемешивания.

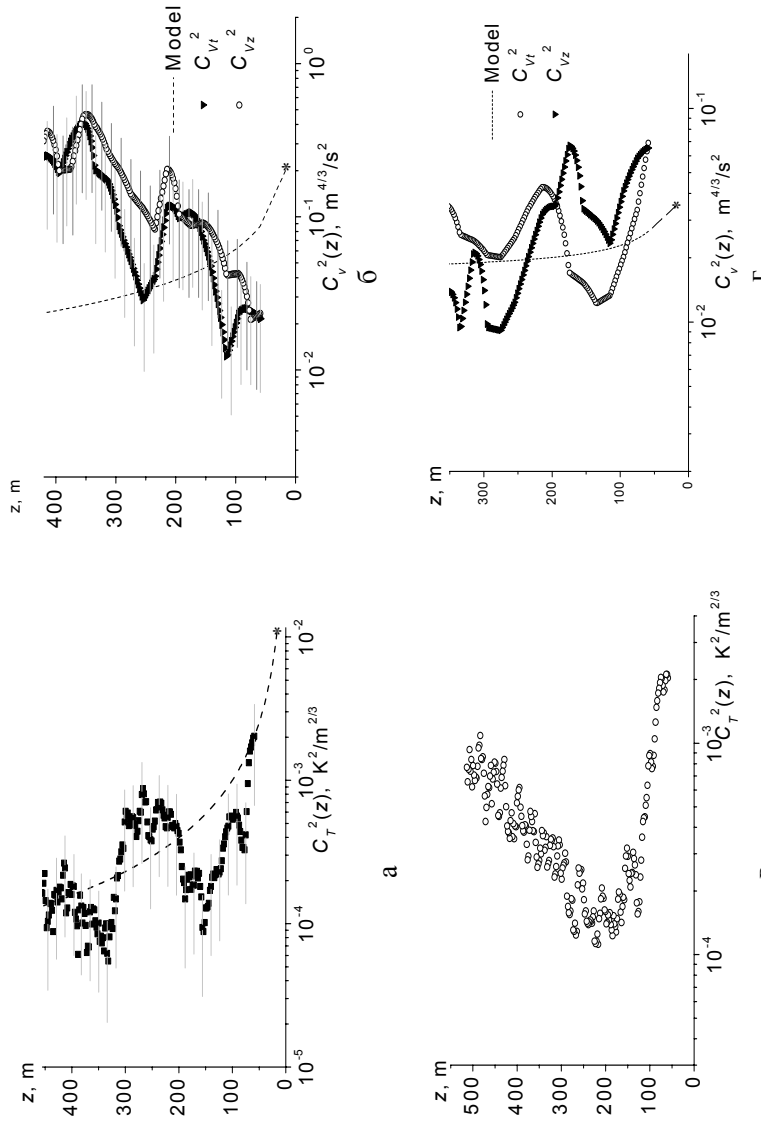

z, m
$C_T^2(z)$, $K^2/m^{2/3}$
а
$C_v^2(z)$, $m^{4/3}/s^2$
б
Model
C_{Vt}^2
C_{Vz}^2
$C_v^2(z)$, $m^{4/3}/s^2$
г
$C_T^2(z)$, $K^2/m^{2/3}$
в

Рис. 1

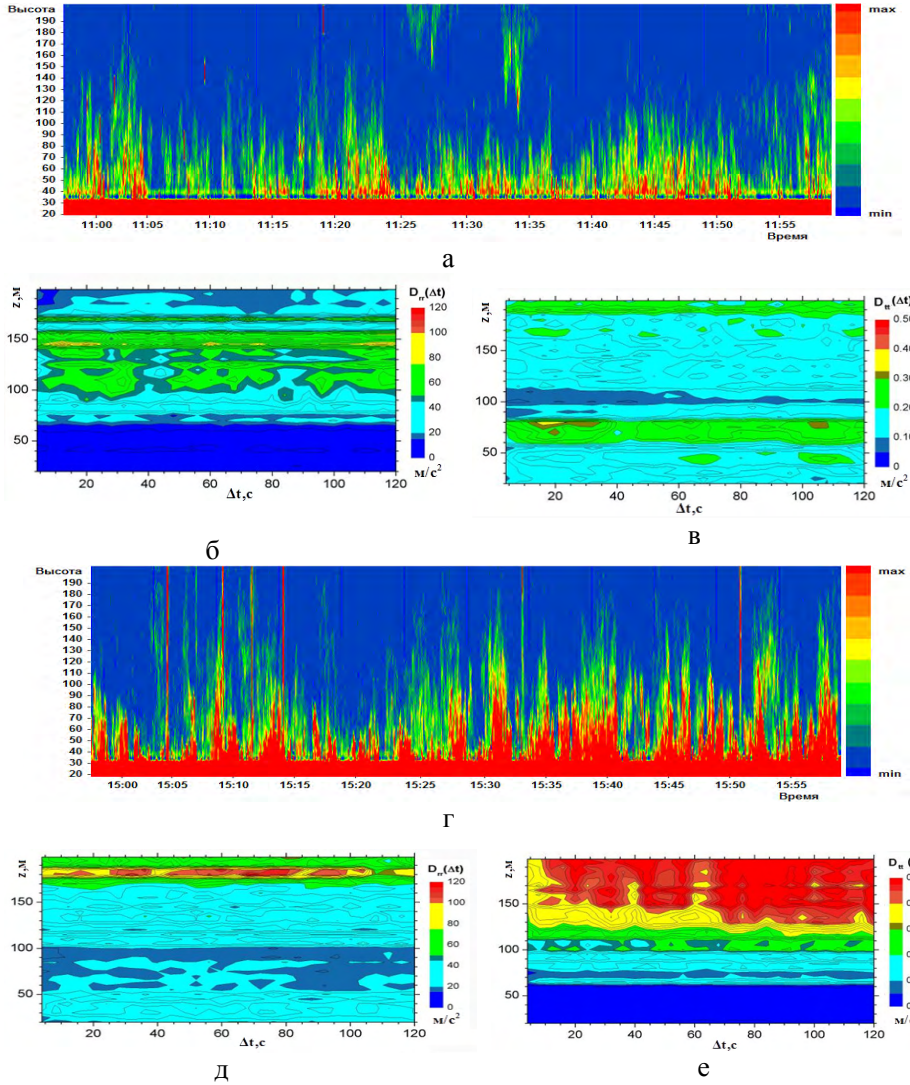


Рис. 2.Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности в 11:00 (*а–в*) и 15:00 (*г–е*)

1. Krasnenko N.P. and Shamanaeva L.G. 16th International Symposium for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing ISARS 2012, Extended Abstracts, 5-8 June 2012, Boulder, Colorado. P. 64-68.
2. Андервуд К.Х., Шаманаева Л.Г. Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 1. С. 102-108.

3. Stafeev P.G., Kapegesheva O.F., Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G. Proc. SPIE. 2012. V.8696. 8696-43. P. 1-7.
4. Kouznetsov R., Kallistratova M. Proc. 14th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. Paris, 2010. http://www.isars2010.uvsq.fr. P. O-TUR/02-1–O-TUR/02-4.
5. http://minisodar.org>.
6. Kouznetsov R., Kallistratova M. Proc. 14th Int. Symp. Advancement of Boundary-layer Remote Sensing. Paris. 2010. http://www.isars2010.uvsq.fr. P. O-TUR/02-1–O-TUR/02-4.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СЛУЧАЙНОГО ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ПОЛЯ ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ, ЕСЛИ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ, ТО ЯВЛЯЕТСЯ ЗАКОНОМ ПРИРОДЫ.

В.И. Кляцкин
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, klyatskin@yandex.ru

Хаос есть место, вмещающее в себя целое.
Именно, если бы он не лежал в основании,
то ни земля, ни вода, ни прочие элементы,
ни весь космос не могли бы и возникнуть.

Секст Эмпирик, *Против учёных*, X 11-12:

В стохастических, параметрически возбуждаемых динамических системах, в отдельных реализациях положительного случайного поля $f(\boldsymbol{r},t)$ может происходить явление кластеризации в фазовом и физическом пространствах. Кластеризация случайного поля – это возникновение компактных областей с большими величинами данного поля на фоне окружающих областей с относительно низкими их значениями. Естественно, что традиционные статистические характеристики (типа моментных и корреляционных функций любого порядка) не отражают явления кластеризации. И если кластеризация осуществляется в пространстве, то это происходит в конкретных реализациях почти всегда, т.е. с вероятностью единица, и характеризуется для пространственной однородной статистической задаче следующими свойствами:

1. С течением времени поле почти во всех точках пространства убывает (разумеется, с какими-то флуктуациями);

2. Но, при этом в самом пространстве $\{\boldsymbol{r}\}$ возникают области малого объема, где это поле кластеризуется.

При этом стохастическое структурообразование обусловлено диффузией случайного поля $f(\boldsymbol{r},t)$ в своем фазовом пространстве $\{f\}$. В этом

случае кластеризация поля любой природы $f(\boldsymbol{r},t)$ является общим свойством динамических полей, и можно сказать, что структурообразование для любых таких случайных полей – закон природы.

На начальном этапе пространственно-временной эволюции динамической системы, описываемой уравнениями в частных производных, параметрически возбуждаемое положительное случайное поле $f(\boldsymbol{r},t)$, любой природы, является логнормальным и для него формулируются условия, при которых кластеризация осуществляется. Такие задачи возникают в гидродинамике, магнитной гидродинамике, физике плазмы, астрофизике и радиофизике. Примечательно, что эти условия имеют прозрачный физико-математический смысл, и они описываются на элементарном математическом уровне (на основе идей статистической топографии), доступном студентам младших курсов, знакомым с элементарными понятиями теории случайных процессов и полей.

1. http://gc.lpi.ru/proceedings.html
2. В.И. Кляцкин, УФН, 182(11), 1235, 2012.
3. V.I. Klyatskin, in *Chaos and Complex Systems*, Proceedings of the 4th International Interdiscipl. Chaos Symp., Springer – Verlag, 2013.

КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ И СПИРАЛЬНОСТЬ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

Б.М. Копров, В.М. Копров, Т.И. Макарова, Г.В. Азизян, Д.Ю. Соколов, М.И. Фортус

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, vkoprov@gmail.com

Теория локально изотропной турбулентности и теория приземного слоя Монина-Обухова были развиты в работах [1,2] и хорошо описывают статистические характеристики полей температуры и скорости при определенных условиях. Однако, поля метеоэлементов, измеренные в натурных условиях, как правило, обнаруживают ряд особенностей, которые не могут быть объяснены в рамках этой теории, в частности наличие в полях температуры и скорости организованных структур.

В ходе наших исследований также обнаружилось, что не все измеренные характеристики поля температуры подчиняются закономерностям, вытекающим из предположения о локальной изотропии. Например, не могут быть объяснены наблюдаемые анизотропия и эксцесс распределения вероятностей для разности температуры на расстояниях порядка сантиметра, если только не предположить существование крупномасштабных температурных неоднородностей, окруженных тонким переходным слоем. Эксцесс обратно пропорционален вероятности

встречи с таким слоем, а асимметрия возникает, как принято считать, из-за различия градиента температуры на верхней и нижней, а также подветренной и наветренной границах неоднородности [3].

В то же время наблюдения и модельные расчеты показали, что перенос тепла и скорости в приземном слое осуществляется в значительной степени именно организованными структурами. Размер этих структур сопоставим с высотой приземного слоя или превышает его [4,5,6]. Развитая в наших работах методика многоточечных по высоте измерений температуры малоинерционными датчиками позволила выявить основные особенности этих пространственных структур и в частности поведение самой крупномасштабной компоненты поля температуры внутри структуры. Это было сделано, во-первых, с помощью разработанных нами программ визуализации временной изменчивости высоты сглаженных изотермических поверхностей и, во-вторых, с помощью разработанной методики автоматического выявления когерентных структур поля температуры. В результате удалось оценить вклад этих структур в вертикальный турбулентный поток тепла [4].

Проводимые нами многоточечные по высоте измерения температуры дают возможность изучать профиль температуры как случайную функцию: вычислять ковариационную матрицу, ее собственные функции и собственные значения, т. е. производить разложение по базису эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) [5]. Этот базис является по существу статистическим портретом когерентных структур. Так, оказалось, что первая ЭОФ не меняет знака во всем диапазоне высот и ее собственное значение составляет около 70% дисперсии. Вторая ЭОФ обладает одним переходом через нуль и дает вклад в дисперсию около 20%, а на долю остальных ЭОФ приходится всего 10% дисперсии.

Многоточечные измерения при горизонтальном размещении датчиков дают возможность вычислять пространственно-временную корреляционную функцию и оценивать радиус корреляции и скорость переноса [5].

Таким образом, описанные методы позволяют изучать как индивидуальные структуры, так и их статистические характеристики.

Синхронные измерения других скалярных величин наряду с измерениями мгновенных профилей температуры и скорости позволили выяснить причину известной из наблюдений корреляции скалярных полей, которые, на первый взгляд, совсем не связаны друг с другом. Объяснение этого феномена основано на осознании двух важнейших фактов. Первый - это преобладание динамического механизма генерации кинетической энергии турбулентности над термическим. Это эквивалентно утверждению о существовании ячеек циркуляции в вертикальной плос-

кости, охватывающих весь приземный слой, основные черты которых не зависят от стратификации плотности. Другой факт - это особенности взаимодействия скалярных полей с поверхностью. В силу этих двух причин поднимающийся воздух *(w>0)* в дневное время несет избыток температуры ($T' > 0$) и водяного пара ($q' > 0$) и недостаток углекислого газа CO_2 ($c' < 0$) и озона O_3 ($o' < 0$) (углекислый газ был частично израсходован растительностью в процессе фотосинтеза, а озон - на окисление органики почвы). При оседании (w<0) значения вариаций всех скалярных величин меняются на обратные, т.е. для коэффициентов корреляции будем иметь: $r_{qT} > 0$, $r_{cT} < 0$, $r_{oT} < 0$. Действительно, измеренные коэффициенты корреляции в условиях конвекции имеют именно такие знаки, причем абсолютные значения коэффициентов часто превышают значение 0,8 [6].

Применение техники линейного статистического прогноза позволило объяснить знаки и абсолютные значения наблюдаемых корреляций между вариациями скалярных полей [7]. Этот метод оказался полезным и при анализе корреляций и ковариаций между напряженностью электрического поля, температурой и компонентами скорости.

Разработанные нами методы измерения циркуляции скорости акустическими методами [8] позволили получать данные о компонентах ковариационного тензора скорости на ротор скорости, в том числе и о его диагональных элементах, сумма которых по определению есть спиральность. В 2012 году на Цимлянской научной станции ИФА РАН был впервые проведен эксперимент по измерению спиральности путем синхронного измерения всех компонент скорости и температуры четырьмя акустическими анемометрами, размещенными в вершинах прямоугольного тетраэдра.

1. Монин А.С. и Обухов А.М. *Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы*.// Труды Геофиз. Инст. АН СССР №24 (151), с. 163-187.
2. Обухов А.М. *Статистическое описание непрерывных полей*. //Труды Геофиз. Инст. АН СССР №24 (151), с. 3-42.
3. Копров Б.М. *Влияние структуры термиков на эксцесс и асимметрию распределений вероятностей для временной производной температуры* // Изв. АН СССР. ФАО. 1988. Т. 24. № 6. С. 579-585.
4. Копров Б.М., Копров В.М., Макарова Т.И. *Конвективные структуры приземного слоя воздуха* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 1, 36-47.
5. Koprov B.M., Zubkovskii S.L., Koprov V.M., Fortus M.I., Makarova T.I. *Statistics of air temperature spatial variability in the atmospheric surface layer*. // Bound.-Layer Meteorol., 1998, **88**, 399-423.

6. Копров Б.М., Копров В.М., Кадыгров Е.Н., Макарова Т.И. *Экспериментальное исследование конвекции в пограничном слое атмосферы: когерентные структуры при ясном небе и при кучевой облачности*.// Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 49. № 4, 470-484.
7. Копров Б.М., Копров В.М., Соколов Д.Ю., Азизян Г.В. *О турбулентном потоке электрического заряда вблизи земной поверхности*.// Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 5. С. 597-606
8. Копров Б.М., Копров В.М., Пономарев В.М., Чхетиани О.Г. *Измерение турбулентной спиральности и ее спектра в пограничном слое атмосферы*. //Доклады РАН, 2005, Т.403, вып. 5, с. 345-350.

ПОТОКИ СПИРАЛЬНОСТИ И ЗАВИХРЕННОСТИ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Копров Б.М. [1], *Копров В.М.* [1], *Чхетиани О.Г.* [1,2]
[1]Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, lgg@ifaran.ru
[2]Институт космических исследований РАН, Москва

Спиральность определяется как скалярное произведение скорости $\mathbf{V}$ и завихренности ($H_h = \int \mathbf{v}\mathrm{rot}\mathbf{v}d^3\mathbf{r}$) и ее отличие от нуля отражает нарушение зеркальной симметрии течения, существующее, например, в экмановском пограничном слое атмосферы (Курганский 1989, Чхетиани 2001). В невязком пределе уравнения Навье-Стокса сохраняют кинетическую энергию и спиральность. Наличие двух квадратичных инвариантов означает возможность существования как двойного каскада, когда каскады энергии и спиральности реализуются на различных участках волновых чисел аналогично двумерной турбулентности, так и каскада спиральности параллельно с каскадом энергии в сторону малых масштабов. Наклон спектра спиральности в этом случае будет совпадать с наклоном спектра энергии – -5/3.

В частности, со спиральным каскадом связано существование точного соотношения, связывающего тройные и двойные корреляции скорости и названного позже законом "2/15" по аналогии с колмогоровским законом "4/5" (Чхетиани 1996). Из этого закона для тензора $T_{i,j,k} = \left\langle v_i(\mathbf{x}) v_j(\mathbf{x}) \omega_k(\mathbf{x}+\mathbf{r}) \right\rangle$ следуют соотношения (Чхетиани 2008)

$$T_{x,x,x} = -\frac{2}{15}\eta r, T_{y,y,x} = T_{z,z,x} = \frac{1}{15}\eta r,$$

$$T_{x,y,y} = T_{y,x,y} = T_{x,z,z} = T_{z,x,z} = -\frac{1}{10}\eta r.$$

Измерения спиральности в АПС связаны с задачей об измерении компонент тензора потока вихря, рассмотренного впервые в (Новиков, 1972) $\langle v_i \Omega_j \rangle = \frac{\varepsilon_{ikl}}{4\pi} \int_V \frac{r_l}{r^3} \langle \Omega_k(x') \Omega_j(x) \rangle d^3x'$.

Первые измерения компонент тензора потока вихря в АПС, выполненные в ИФА АН СССР (Копров и др. 1987) на основе акустического метода измерения циркуляции, разработанного в (Бовшеверов и др. 1971), указали на ряд отличий от выводов (Новиков, 1972), в том числе и существование корреляций между компонентами горизонтальной циркуляции и горизонтальной скорости.

Баланс турбулентной спиральности H в пограничном слое атмосферы описывается уравнением

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial \langle \upsilon_i \upsilon_k \rangle}{\partial x_k} \Omega_i - \langle \upsilon_i \upsilon_k \rangle \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_k} + 2\Omega_{oi} \frac{\partial E}{\partial x_i} + 2\beta \langle \theta \omega_z \rangle$$

$$- \frac{\partial}{\partial x_k} \left\langle \frac{p}{\rho} \omega_k + \upsilon_i \upsilon_k \omega_i - \frac{1}{2} \omega_k \upsilon_i \upsilon_i \right\rangle + \nu \Delta H - \eta ,$$

из которого следует её оценка $H = 2K\tau\Omega(\nabla \times \Omega) - \Omega_0 \tau \frac{dE}{dz} F(Ri)$.

Здесь: K - турбулентная вязкость, $\Omega = \nabla \times \mathrm{V}$ - крупномасштабный вихрь, Ω_0 - скорость вращения Земли, β - параметр плавучести, θ - пульсации температуры, $F(Ri)$ - функция от числа Ричардсона, $\tau = l / E^{1/2}$, l - характерный масштаб турбулентности. Отсюда плотность турбулентной спиральности в пограничном слое, близком к нейтральному, оценивается величиной $H \approx 3 \cdot 10^{-3}$ - $2 \cdot 10^{-2}$ м·с$^{-2}$.

Первые измерения спиральности в АПС, проведенные на Звенигородской научной станции ИФА РАН в сентябре 2004 г. указали на близость наклона спектра спиральности к -5/3 (Копров и др. 2005). Интегральная оценка спиральности по спектру дает значения 0.02 - 0.03 м·с$^{-2}$, что совпадает по порядку величины с приведенными выше теоретическими оценками.

Последующие наблюдения 2007, 2010 2012 гг., выполненные в условиях слабо-неустойчивой и устойчивой стратификаций дали схожие результаты – показали асимметрию и негауссов характер функции плотности вероятности для спиральности, корреляцию вертикальной компоненты циркуляции с температурой, а также продемонстрировали устойчивые её знаки, согласующиеся с оценками балансов и распределений спиральности.

Для структурных функции смешанных корреляций скорости и завихренности $v_i v_k \Omega_l$ имеем наклоны частотного спектра f^{-1}, что является первым экспериментальным подтверждением "закона 2/15".

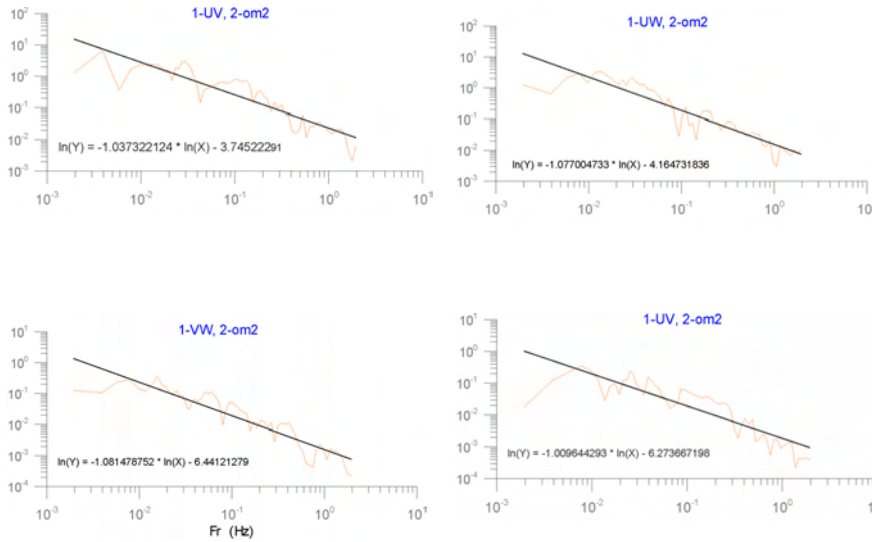


Рис. 2. Спектры для различных компонент тензора $v_i v_k \Omega_l$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-05-01008) и программы Президиума РАН П-19 "*Фундаментальные проблемы нелинейной динамики в математических и физических науках*".

BREAKING OF VORTEX LINES AS A ROUTE TO THE KOLMOGOROV-OBUKHOV SPECTRUM

E.A.Kuznetsov
P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow
Novosibirsk State University, Novosibirsk
kuznetso@itp.ac.ru

Recent numerical experiments in the framework of the Euler equations for two colliding Lamb vortex dipoles (P. Orlandi, S. Pirozzoli and G. F. Carnevale, J. Fluid Mech. (2012), vol. 690, pp. 288-320) testify to favor of the collapse appearance when the vorticity becomes infinite in a finite time

according to the law $(t_0 - t)^{-1}$, the collapse region vanishes like $(t_0 - t)^{1/2}$, and the velocity component parallel to the vorticity blows up proportionally to $(t_0 - t)^{-1/2}$. During the collapse the region of the maximal vorticity represents the pancake-like structure. In this paper it is shown that all these self-similarities can be obtained from the analysis of the singularity while breaking of vortex lines. In the collapse instant the vorticity Ω gets the singularity of the Kolmogorov-Obukhov type: $\Omega \sim x^{-2/3}$ where x coincides with the direction of the breaking.

RANS МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОГО АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ: ВИХРЕВОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ, ЭНЕРГЕТИКА И ГЛОБАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

А. Ф. Курбацкий[*, **], *Л. И. Курбацкая*[***]
[*]Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
[**]Новосибирский государственный университет,
[***]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, kurbat@itam.nsc.ru

RANS схема турбулентности [1], включающая эффект внутренних гравитационных волн, применена для анализа структуры течения и статистики турбулентности устойчиво стратифицированного атмосферного пограничного слоя (АПС). Акцент делается на анализе возможности RANS метода моделирования турбулентности в описании некоторых особенностей вихревого перемешивания, энергетики и глобальной перемежаемости турбулентности в устойчивом АПС.

1. Вихревое перемешивание: коэффициенты диффузии импульса и тепла.

С ростом устойчивости АПС вертикальный перенос импульса и тепла турбулентными вихрями существенно ослабляется стратификацией. Возрастающая при этом активность внутренних гравитационных волн способствует поддержанию импульса течения, но не тепла. Включение в трехпараметрическую $E - \varepsilon - \langle \theta^2 \rangle$ RANS схему стратифицированной турбулентности [1] эффекта воздействия внутренних волн на перенос импульса и тепла позволяет корректно воспроизвести поведение вихревых коэффициентов диффузии импульса и тепла (рис. 1) в согласии с данными измерений в атмосфере [2].

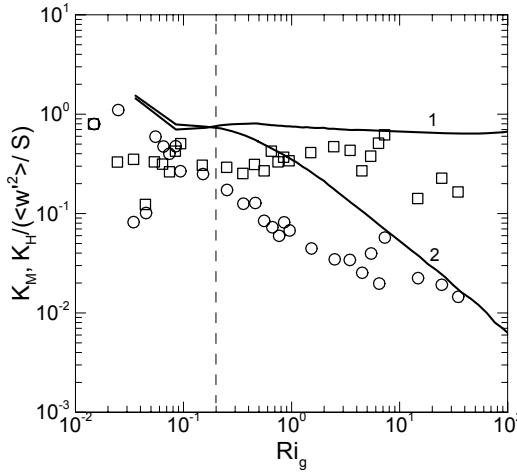


Рис. 1. Коэффициенты вихревой диффузии импульса K_m (линия-1) и тепла K_h (линия -2), нормализованные на величину $\overline{w'^2}/S$, как функции числа Ричардсона в устойчиво стратифицированном планетарном пограничном слое. Данные измерений [2]: K_m - □, K_h - O.

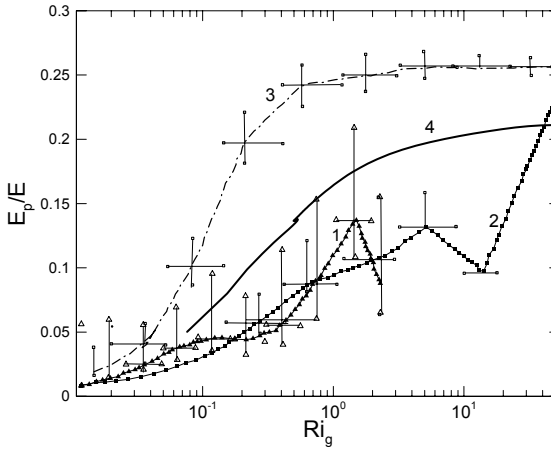


Рис. 2. Отношение турбулентной потенциальной энергии к полной турбулентной энергии, E_p/E, в зависимости от градиентного числа Ричардсона Ri_g. Линия 1 – измерения в атмосфере, линия 2 –лабораторный эксперимент, линия 3 - LES расчет [3], линия 4 - результаты трехпараметрической RANS модели.

3. Энергетика устойчиво стратифицированного АПС

Трехпараметрическая RANS схема турбулентности, включая уравнения баланса для турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) и турбулентной потенциальной энергии (ТПЕ), позволяет анализировать преобразование ТКЕ в стратифицированных геофизических течениях. Рис. 3 показывает вычисленную фракцию ТПЕ, E_p/E ($E=E_p+E_k$ - полная энергия турбулентности) как функцию числа Ri_g вместе с недавними данными измерений в атмосфере (линия 1), лаборатории (линия 2) и LES расчетом [3]. Результаты численного моделирования по трехпа-

раметрической RANS - модели (линия 4) и LES расчет(линия 3) показывают монотонную зависимость: отношение E_p / E увеличивается с ростом числа Ri_g и стремится к конечному значению $E_p / E \approx 0,21$.

4.Глобальная перемежаемость турбулентности в устойчивом атмосферном АПС

Отличительная особенность устойчиво стратифицированных пограничных слоев связана с перемежающейся турбулентностью, которая характеризуется короткими периодами турбулентного состояния (bursts) и промежуточными периодами относительно слабых флуктуаций.

В настоящем исследовании предпринята попытка выяснить чувствительность RANS схемы турбулентности высокого уровня замыкания в воспроизведении перемежающегося характер турбулентности в устойчивом атмосферном пограничном слое как вблизи поверхности, так и в окрестности струйного течения в верхней части пограничного слоя.

Представленные ниже результаты вычислительного эксперимента ставили своей целью выяснение чувствительности трехпараметрической RANS схемы турбулентности к воспроизведению перемежающейся турбулентности как вблизи твердой поверхности (здесь не показано), так и ‘поднятой’ турбулентности, генерируемой струйным течением низкого уровня в термически устойчивом АПС.

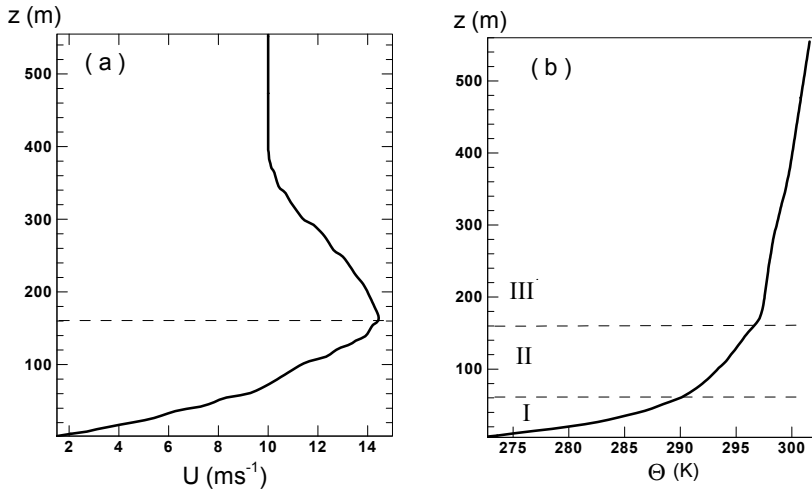


Рис. 3. Струйный профиль скорости (a) и профиль потенциальной температуры (b) в квазиустановившемся состоянии сильно устойчивого пограничного слоя (после 9 часов интегрирования).

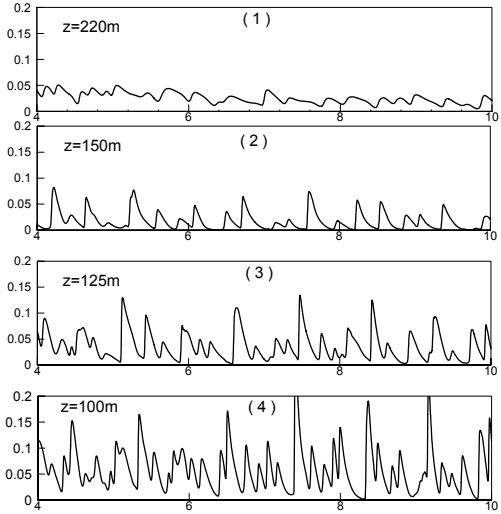


Рис. 4. Временные ряды кинетической энергии турбулентности $E = 1/2(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ над верхней ветвью струи (диаграмма (1)) и на нижней ветви струи (диграммы (2) - (4)) в сильно устойчивом пограничном слое ($\overline{(w'\theta')}_s = -0,05$ К м с$^{-1}$), полученные при численном моделировании по трехпараметрической RANS схеме турбулентности. На каждой из диаграмм по оси абсцис – локальное время в часах, по оси ординат - кинетическая энергия турбулентности E (м^{2}с$^{-2}$).

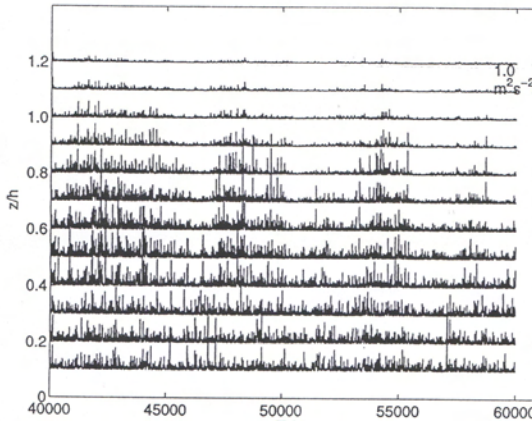


Рис. 5. Временные ряды перемежающейся кинетической энергии турбулентности $E = 1/2(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$, полученные в сильно устойчивом пограничном слое LES моделированием [4] ($\overline{(w'\theta')}_s = -0,05$ К м с$^{-1}$; z – вертикальная координата, h – высота пограничного слоя).

1. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. О турбулентном числе Прандтля в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 2. С.187-196.
2. Pardyjak E. R., Monti P., Fernando H. J. S. Flux Richardson number measurements in stable atmospheric shear flows // J. Fluid Mech. 2002. V. 459. P. 307-316.
3. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I., Esau I., Mauritsen T.,

Miles M.W. Turbulence energetic in stably stratified geophysical flows: Strong and weak mixing regimes // Quarterly Journal of the Meteorological Society. 2008. V. 134. P. 793-799.

4. Zhou B., Chow F. K. Large-Eddy Simulation of the Stable Boundary Layer with Explicit Filtering and Reconstruction Turbulence Modeling // J. Atmos. Sci. 2011. V. 68. P. 2142- 2155.

NEW ALGORITHM FOR A TWO-EQUATION TURBULENCE MODEL IMBEDDED IN THE INM PE OCEAN CIRCULATION MODEL

Moshonkin S.N., V.B. Zalesny, A.V. Gusev
Institute of Numerical Mathematics Russian Academy of Science, Moscow,
atarexm@himki.net

Splitting algorithm with respect to the physical processes and space coordinates for a two-equation turbulence model based on turbulent kinetic energy (TKE) equation and frequency of TKE dissipation (FD) equation is presented. Equations for FD and TKE are solved analytically at the generation-dissipation splitting stage. Especial analytical solution is found for the well mixing layer with buoyancy and shift frequencies tending to zero. As a result turbulence model is high adaptive to the ocean circulation model. Turbulence model based on splitting algorithm exceeds modern models of intense turbulence from the point of operational speed. Eddy-permitting model of the North Atlantic (from 20S, with Mediterranean sea), the Arctic Ocean, and the Bering Sea coupled circulation (INM RAS; 0.25 degree spatial resolution; original splitting numerical methods) is used for seasonal cycles simulation. There are forty levels which become more frequent to the ocean surface where turbulence is more intensive. Spatial and temporal distributions of TKE and FD are simulated, analyzed and compared with observational characteristics. Results of numerical experiments using turbulence model and traditional Monin-Obukhov parameterization are compared with observations at the Ocean Whether Station "C" (storm-track zone of North Atlantic). Turbulence model demonstrates principal more adequate results than denote parameterization. It allow make a conclusion that using turbulence model for ocean climate investigations will give not only quantitative but new qualitative results. Directions for further development of the turbulence model and algorithmic resources for acceleration of its computation speed are defined. This model will be used for numerical investigations of seas and ocean dynamics as well as for variational data assimilation tools development. (supported by RFBR grant 12-05-00814-a)

ПРОФИЛИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ТРЕНИЯ В 300-МЕТРОВОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Корнеев П.А., Мацкевич М.К.
«НПО «ТАЙФУН», Обнинск, mazurin@typhoon.org

Представлены результаты экспериментальных исследований потоков температуры и скорости трения, измеренные на Высотной метеорологической мачте в г. Обнинске за последние три года. Данные получены в условиях неустойчивой стратификации. Измерения проводились как в приземном, так и в пограничном слое (начиная от 4-х м и кончая высотой 265 м). Использовались современные трехкомпонентные акустические анемометры зарубежного производства, а также анемометры, разработанные и изготовленные в “НПО “Тайфун”. Измерения в ПС проводились на 3-х уровнях (4, 16 и 25 м) и на 5-и уровнях в АПС (73, 121, 169, 217 и 265 м). Наряду с турбулентными потоками в работе рассмотрены другие характеристики турбулентности. Прежде всего, это средние квадраты пульсаций вертикальной и горизонтальной компонент скорости ветра и пульсаций температуры, а также коэффициенты корреляций для потоков тепла и трения. В качестве пульсаций температуры использовалась акустическая температура, измеряемая этими же анемометрами.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ХОЛОДНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МАЧТЕ В ОБНИНСКЕ

Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Кулижникова Л.К.,
Мацкевич М.К., Корнеев П.А.
«НПО «ТАЙФУН», Обнинск, novitsky@typhoon.obninsk.ru

После существенного обновления в последние годы комплекса измерительной аппаратуры на высотной метеорологической мачте (ВММ) в Обнинске появилась возможность измерения вертикальных профилей характеристик атмосферной турбулентности в нестационарных условиях.

В 2011-2012 годах на ВММ проводились измерения компонент скорости ветра и пульсаций температуры воздуха малоинерционными аку-

стическими анемометрами на пяти высотах. Были выбраны шесть периодов прохождения через территорию расположения высотной мачты хорошо выраженных холодных атмосферных фронтов. Помимо пульсаций ветра и температуры стандартными датчиками измерялись также модуль скорости и направление ветра, температура воздуха на разных высотах, а также относительная влажность и давление атмосферы вблизи поверхности земли. Эти измерения использовались для характеристики степени выраженности атмосферных фронтов. По данным акустических анемометров рассчитаны значения вертикальных потоков тепла, потока количества движения, стандартных отклонений пульсаций температуры, горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра за 2-х минутные периоды времени. Получены их значения в зоне атмосферных фронтов, а также в невозмущенном атмосферном слое до и после прохождения фронта.

СПОСОБ ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСА ФРИДА И ЭФФЕКТИВНОГО ВНЕШНЕГО МАСШТАБА ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ

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

По аналогии с радиусом когерентности атмосферы r_0, определяемым как интеграл для структурного параметра показателя преломления атмосферы $C_n^2(\xi)$, для вертикальных атмосферных трасс введен **эффективный внешний масштаб** L_0^*, характеризующий турбулентную атмосферу в целом. Важность знания величины внешнего масштаба для атмосферы в целом, определяется тем, что его величина формирует энергетику турбулентности атмосферы, уменьшение его величины приводит к повышению вклада высших мод в фазовые флуктуации, а это важно при проектировании систем адаптивной оптики.

Первоначально, в 1997 году, этот параметр был введен как интегральный параметр, минимизирующий функционал от структурной функции фазы. На основе численных расчетов с высотными моделями атмосферы было показано, что этот масштаб имеет значения в интервале 20-50 м. Предлагается оптический способ его определения из измерений дисперсии дрожания изображения внеатмосферного источника, выполненных для нескольких значений приемной апертуры. Расчетная

формула была получена для модели спектра атмосферной турбулентности, учитывающей конечность внешнего масштаба турбулентности. Были выполнены измерения апертурной зависимости дисперсии дрожания изображения края солнечного диска. Измерения проводились на астрономическом солнечном телескопе АСТ в Мондах с использованием датчика Брандта.

По данным экспериментальных измерений были рассчитаны значения **эффективного внешнего масштаба турбулентности атмосферы** для дневных условий. Оказалось, что значения этого масштаба лежат в интервале 8-12 м, соответственно **для радиуса Фрида значения составляют 25 - 41 мм.** Оценки показывают, что неучет влияния внешнего масштаба турбулентности при измерении радиуса когерентности из дрожания изображения в фокусе телескопа завышает измеренные значения примерно на 10-25%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукин В.П., Носов Е.В., Фортес Б.В. *Эффективный внешний масштаб атмосферной турбулентности* //Оптика атмосферы и океана. 1997. т.10. No.2. с.162 – 171.
2. Lukin V.P. *Reference beacon design and model of atmospheric turbulence* //IAU Site 2000 Worshop “Astronomical Site Evaluation in the Visible and Radio Range”. 2000. pp.578-587.
3. Lukin V.P. *Atmospheric turbulence parameters measurements* //IAU Site 2000 Worshop “Astronomical Site Evaluation in the Visible and Radio Range”. 2000. pp.18-27.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ МАСШТАБЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ МОНИНА-ОБУХОВА В АНИЗОТРОПНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

В.В. Носов[1], В. М. Григорьев[2], П.Г. Ковадло[2], В.П. Лукин[1], Е.В. Носов[1], А.В. Торгаев[1]
[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Nosov@iao.ru
[2]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Турбулентные масштабы скорости V_* (скорость трения) и температуры T_* являются важными характеристиками турбулентности в теории подобия Монина-Обухова [1]. В случае плоскопараллельных течений (изотропный пограничный слой), масштабы скорости и температуры связаны [1] с вертикальными производными средней скорости течения $\overline{V}$ и средней абсолютной температуры $\overline{T}$ выражениями

$$d\,\overline{V}/dz = V_* / (æ\, z)\,, \quad d\,\overline{T}/dz = T_* / z.$$

Здесь æ = 0.4 - постоянная Кармана, z – высота над подстилающей поверхностью.

В работе [2], посвященной полуэмпирическим гипотезам теории турбулентности в атмосферном анизотропном пограничном слое, теоретически и экспериментально показано, что теория подобия турбулентных течений может быть распространена на произвольный анизотропный пограничный слой, который можно считать локально слабо анизотропным. В частности, проведена экспериментальная проверка слабой анизотропности горного пограничного слоя. В таком пограничном слое все характеристики турбулентности становятся функциями от параметра стратификации ζ ($\zeta = z/L$, L – масштаб Монина-Обухова). Параметр ζ за последние полтора десятка лет получил устойчивое собственное название – число Монина-Обухова. Это название отражает суть параметра, характеризующего локальную температурную стратификацию, и имена авторов теории подобия, которые ввели в теорию масштаб Монина-Обухова (как толщину подслоя динамической турбулентности). Для безразличной стратификации число Монина-Обухова совпадает с динамическим числом Ричардсона.

Как показано в [2], в анизотропном пограничном слое число Монина-Обухова, изменяющееся от точки к точке в слое, характеризует изменения структуры внешнего притока энергии, переходящей затем в энергию турбулентности, и его можно считать основным параметром турбулентности в таком слое. При этом турбулентные масштабы V_* и T_* становятся функциями от числа Монина-Обухова ζ.

Основные полуэмпирические гипотезы обычно сводятся к заданию связи между вторыми моментами пульсаций (отклонений от среднего) скорости $\overline{v_i' v_j'}$ и температуры $\overline{v_j' T'}$ и осредненными полями скорости $\overline{v_i}$ и температуры $\overline{T}$. Именно, в общем случае анизотропной турбулентности полагают [1]

$$\overline{v_i' v_j'} = \overline{v_n' v_n'}\ \delta_{ij}/3 - (K_{in}\Phi_{nj} + K_{jn}\Phi_{ni})/2, \quad \Phi_{ij} = \partial\overline{v_i}/\partial x_j + \partial\overline{v_j}/\partial x_i, \quad \overline{v_j' T'} = -K_{Tji}\ \partial\overline{T}/\partial x_i, \quad (1)$$

где по повторяющимся индексам подразумевается суммирование. Компоненты K_{ij} симметричного тензора K в определениях (1) называются коэффициентами турбулентной вязкости, а компоненты K_{Tij} тензора K_T имеют смысл коэффициентов турбулентной температуропроводности или коэффициентов турбулентной диффузии для пассивной примеси, которой является потенциальная температура. Отсюда [2] для локально слабо анизотропного пограничного слоя получаем

$$\overline{v_i' v_j'} = \overline{v_n' v_n'}\,\delta_{ij}/3 - K\,(\partial \overline{v_i}/\partial x_j + \partial \overline{v_j}/\partial x_i)\,, \qquad \overline{v_j' T'} = -\,K_{Tji}\;\partial\,\overline{T}/\partial x_i$$

Принятые в настоящее время выражения для коэффициентов K, K_{Tij} являются результатом обобщения экспериментальных данных, полученных над приблизительно ровной поверхностью (не в горных районах), и учитывают действие термической стратификации. Для средней скорости ветра, направленной вдоль оси x_1, имеем [1]

$$K_{Tij} = \beta_{ij} K_T\,, \quad K_T / K = \alpha\,, \quad \alpha = Pr^{-1}\,, \quad K = K(z) = æ\, V_* z / \varphi(\zeta),$$
$$\zeta = z/L,$$
$$\beta_{33} = 1,\ \beta_{11} = 8.04\,,\ \beta_{22} = 4.21,\ \beta_{13} = -3.51\,,$$
$$\beta_{31} = -0.49\,,\ \beta_{12} = \beta_{21} = \beta_{23} = \beta_{32} = 0\,. \qquad (2)$$

(погрешность определения коэффициентов β_{ij} не превышает 30 % [1]). Здесь $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$, $\varphi(\zeta)$ – универсальная функция подобия, задающая тип стратификации. Масштаб Монина-Обухова L в (2) введен в работах А.С. Монина, А.М. Обухова [1] и определяется формулой

$$L = V_*^2/(\alpha\, æ^2 \beta T_*),\ \beta = g/\overline{T},\ V_*^2 = -\,\overline{v_1' v_3'}\,,\ \alpha\, æ\, V_* T_* = -\,\overline{v_3' T'}\,, \qquad (3)$$

где g – ускорение силы тяжести. Экспериментальные данные для отношения $\alpha(\zeta) = K_T / K$, показывают, что при безразличной ($|\zeta| \le 0.05$) и неустойчивой ($\zeta < -0.05$) стратификациях величина $\alpha(\zeta)$ близка к постоянной, $\alpha \approx \alpha_0 = 1.17$, $Pr \approx 0.85$ (Pr – турбулентное число Прандтля) [1]. Однако при устойчивой стратификации ($\zeta > +0.05$), она может заметно уменьшаться (при сильной устойчивости).

В приземном слое в случае сильной неустойчивости ($-\zeta \gg 1$) из соотношений (1) - (3) можно получить простые асимптотические зависимости турбулентных масштабов V_* и T_* от числа Монина–Обухова ζ. В этом случае модуль продольной горизонтальной производной от средней температуры обычно существенно меньше модуля вертикальной производной. Сама же вертикальная производная в сильной неустойчивости близка к отрицательной постоянной величине [2] ($d\,\overline{T}/dz \approx const < 0$). Для наблюдений вблизи подстилающей поверхности высоту z можно приблизительно считать фиксированной ($z \approx const$). В этом случае изменения числа Монина–Обухова ζ будут вызываться только вариациями масштаба L. Учитывая известные [1] асимптотики функции подобия $\varphi(\zeta)$, из (1) - (3) находим:

$$T_* = c_1\,|\zeta|^{1/3}, \quad V_* = c_2\,|\zeta|^{-1/3}; \quad -\zeta \gg 1, \qquad (4)$$

где c_1, c_2 - неизвестные константы, подлежащие экспериментальному уточнению. В области сильной устойчивости ($\zeta \gg 1$) начинает сказываться влияние функции $\alpha(\zeta)$, $\alpha = Pr^{-1}$, точное выражение для которой в настоящее время неизвестно. Поэтому вопрос о теоретических пред-

ставлениях для масштабов V_* и T_*. при сильной устойчивости остается открытым.

В результате экспедиционных работ 2000-х гг., проведенных в горных и равнинных районах, авторами настоящей работы накоплена обширная экспериментальная база данных приземных измерений турбулентных характеристик в различных метеоусловиях. Накопленные данные существенно расширяют область применимости результатов [2]. В частности, получены новые данные для турбулентных масштабов поля скорости V_* и температурного поля T_*.

Значительно расширен диапазон наблюдавшихся чисел Монина–Обухова. В одном из сеансов измерений (оз. Байкал, 2006 г.) зарегистрирована сверхсильная неустойчивость с числом Монина-Обухова $\zeta = -102819{,}2$ ($T_* = 53°$, $V_* = 3.2 \cdot 10^{-3}$ м/с). В целом, доступный для теоретического анализа диапазон наблюдаемых чисел Монина-Обухова в настоящее время составляет: $-102819 \le \zeta \le +197$. Этот диапазон включает области как сверхсильной устойчивости ($\zeta \gg 1$), так и сверхсильной неустойчивости ($-\zeta \gg 1$).

На рис. 1, 2 приведены экспериментальные результаты для масштабов температуры T_* и поля скорости V_*, как функций от универсального параметра – числа Монина-Обухова ζ. Данные рис. 1, 2 получены в горном пограничном слое в разное время, в различных географических районах, в отличающихся друг от друга региональных метеоситуациях.

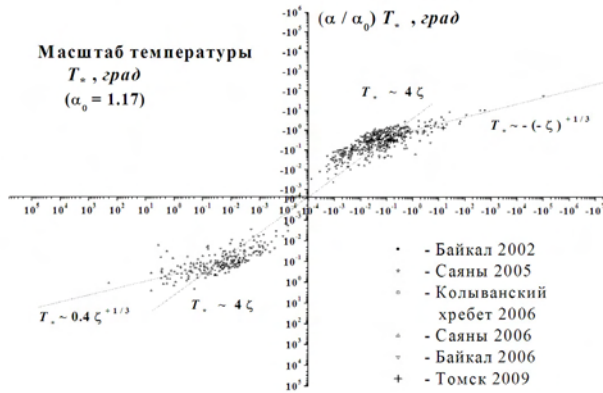


Рис. 1. Турбулентный масштаб температуры T_* в горном анизотропном пограничном слое.

Диапазон изменения числа Монина-Обухова: $-102820 \le \zeta \le +197$.

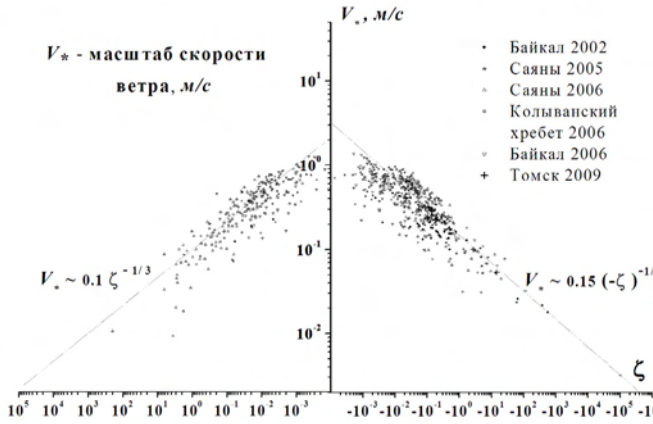


Рис. 2. Турбулентный масштаб скорости V_* в горном анизотропном пограничном слое.

Диапазон изменения числа Монина-Обухова: $-102820 \le \zeta \le +197$.

На рис. 1, 2 пунктирными линиями в области $\zeta < 0$ показаны полученные выше теоретические зависимости (4) для турбулентных масштабов при неустойчивой стратификации (как показывают эксперименты для α [1], при $\zeta < 0$ можно считать $\alpha = \alpha_0$, тогда на рис. 1 $(\alpha/\alpha_0)T_* = T_*$). Зарегистрированные данные устойчиво группируются около этих зависимостей. Относительная погрешность данных рис. 1, 2 в основном не превышает 40%. Такая погрешность соответствует (в 2 - 3 раза большей) максимальной погрешности [1, 2] измерений структурных характеристик флуктуаций температуры C_T^2 и скорости C_V^2 в реальной атмосфере. Это согласуется с теорией подобия, в которой $C_T^2 \sim T_*^2$, $C_V^2 \sim V_*^2$ [1] (и, следовательно, погрешности C_T^2, C_V^2 приблизительно вдвое больше погрешностей T_*, V_*).

Из рис. 1, 2 следует, что данных всех сеансов измерений неплохо согласуются между собой, поэтому, как функции от числа Монина-Обухова, их можно объединять независимо от типа региональных метеоситуаций. Таким образом, дополнительно подтверждены выводы, сделанные в статье [2]. На основании приведенных в настоящей работе данных можно утверждать, что локальная слабая анизотропность горного пограничного слоя наблюдается в измерениях, произведенных в разные времена года, в различных горных регионах, на трассах с различными перепадами высот.

Литература

1. Монин А.С., Яглом А.М. *Статистическая гидромеханика*. Т.1. М.: Наука, 1965. 639 С.; Т.2. М.: Наука, 1967, 720 С.
2. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. *Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое* // Оптика атмосферы и океана, 2005, т.18, № 10, с.845-862.

КОГЕРЕНТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В.В. Носов[1], В. М. Григорьев[2], П.Г. Ковадло[2], В.П. Лукин[1], Е.В. Носов[1], А.В. Торгаев[1]

[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Nosov@iao.ru

[2]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Как известно, экспериментальные данные измерений параметров турбулентности обнаруживают существование в турбулентной атмосфере детерминированных образований - когерентных структур.

А.С. Монин и А.М. Яглом [1] определяют когерентную структуру как неслучайную нелинейную устойчивую суперпозицию крупномасштабных компонент турбулентности. Однако процесс распада гидродинамической ячейки, как установлено в наших работах [2 - 4], продолжается до самых мелких вихрей, которые еще могут существовать в воздухе. Поэтому в [3, 4] понятие «когерентная структура» расширено. Гидродинамической когерентной структурой называется компактное образование, включающее в себя долгоживущую пространственную (обычно, вихревую) структуру, возникающую в результате продолжительного действия термодинамических градиентов, и продукты ее дискретного когерентного каскадного распада. В расширенном понимании когерентная структура есть уединенное солитонное решение уравнений гидродинамики, и содержит как крупномасштабную, так и мелкомасштабную турбулентность. Частота когерентно распадающегося главного энергонесущего вихря является основным признаком когерентной структуры. Размеры когерентной структуры нечеткие. Течения, внешние по отношению к главному вихрю, могут переносить продукты ее распада на значительные расстояния, образуя длинный турбулентный след.

Процесс возникновения турбулентности из ламинарных течений обычно называется сценарием стохастизации. Как показано в [2 - 4], известные сценарии стохастизации описывают процесс образования энергонесущего вихря и его дальнейший когерентный каскадный распад, т. е. процесс возникновения одной когерентной структуры. При этом известные процессы перехода ламинарных течений в турбулентные

(распад ячейки Бенара, обтекание жидкостью препятствий и др.) можно считать когерентными структурами (или сложением таких структур). В [2 - 4] установлено, что турбулентность в когерентной структуре оказывается практически детерминированной, а спектр пассивной примеси (температуры) в ячейке фрактален.

Экспериментальные данные измерений параметров турбулентности в различных географических районах и метеоситуациях показывают [2 - 5], что в открытой атмосфере часто наблюдаются протяженные области, в которых определяющее влияние имеет одна крупная когерентная структура. Турбулентность в таких областях называется когерентной. Некогерентная колмогоровская турбулентность обнаруживается, как правило, над участками с ровной подстилающей поверхностью.

Когерентная турбулентность отличается от некогерентной колмогоровской турбулентности более быстрым убыванием турбулентного спектра (скорости или температуры) в инерционном интервале ($\sim f^{-8/3}$ вместо $\sim f^{-5/3}$) и меньшим вкладом высокочастотных компонент (рис. 1).

Как установлено в [3, 4], когерентная турбулентность есть основная причина значительных отклонений постоянных Колмогорова и Обухова (в законе Колмогорова-Обухова) от своих стандартных значений и, как следствие, больших погрешностей в измерениях характеристик турбулентности.

В воздушных потоках за препятствиями появляются термодинамические градиенты (давления) и образуются когерентных структуры. Нами обнаружено (рис. 1), что с увеличением расстояния от препятствия вихри - продукты распада когерентных структур смешиваются с окружающей атмосферой в турбулентном следе, возникающим за обтекаемым препятствием, а турбулентность из когерентной постепенно переходит в колмогоровскую некогерентную. Это явление наблюдается в разных метеоситуациях для препятствий различных форм. Характерные масштабы явления зависят от размеров препятствий и скоростей набегающих потоков. Установленный экспериментальный результат подтверждает перенос внешним течением продуктов распада когерентной структуры, которые при этом образуют длинный турбулентный след.

В [3, 4] теоретически показано, а в [5] экспериментально подтверждено, что при наличии в атмосфере крупных когерентных структур происходит значительное ослабление фазовых флуктуаций оптического излучения по сравнению с колмогоровской турбулентностью. Этот эффект позволил нам выработать ряд рекомендаций по оптимальному размещению наземных оптических телескопов.

Для построения теоретической модели Ф(æ) трехмерного спектра когерентной турбулентности можно использовать кармановскую модель с соответствующим убыванием в инерционном интервале. Такая модель была получена в [2]. В отличие от колмогоровской турбулентности, для которой в инерционном интервале $\Phi(æ) \sim æ^{-11/3}$, спектр когерентной турбулентности в этом интервале убывает быстрее: $\Phi(æ) \sim æ^{-14/3}$.

Как следует из [2], кармановский одномерный пространственный спектр температуры одиночной когерентной структуры можно записать в виде $V(æ, æ_0) = c_V æ_0 (æ_0^2 + æ^2)^{-4/3}$, где $c_V = 0.514\, C_T^2$, $æ_0 = 2\pi/L_0$, C_T^2 – структурная характеристика, L_0 –внешний масштаб турбулентности. Этот спектр, как функция $æ_0$, имеет максимум в точке $æ_0 = æ_{0\,max} = (3/5)^{1/2}æ$. При этом $V(æ, æ_{0\,max}) = c_V (3/5)^{1/2}(5/8)^{4/3} æ^{-5/3}$, и везде на æ-полуоси $V(æ, æ_0) \le V(æ, æ_{0\,max}) \sim æ^{-5/3}$. Отсюда видно, что одномерный спектр колмогоровской турбулентности, имеющий в инерционном интервале 5/3- убывание ($V(æ) \sim æ^{-5/3}$), является верхней огибающей всех спектров $V(æ, æ_0)$ одиночных когерентных структур с различными внешними масштабами L_{0i}, $i = 1,\ldots, N$.

Если разница между L_{0i}, и $L_{0\,i+1}$ невелика (например, $L_{0i}/L_{0\,i+1} = 2 - 8$), то сумма спектров разных когерентных структур в инерционном интервале практически не отличается от колмогоровской зависимости $\sim æ^{-5/3}$. На это указывают кривые 3-5 на рис. 2 (на рис.2 представлены частотные спектры W флуктуаций температуры для $C_T^2 = 0.56$ м$^{-2/3}$ К^2, скорости ветра 3.0 м/с и $L_{0\,1} = 10$ м). Как видно, чем больше в сумме близких по размеру когерентных структур, тем длиннее оказывается колмогоровский инерционный интервал спектра (наибольшая длина для кривой 5, $N = 6$). Справа вверху на рис. 2 – частотные спектры изолированных одиночных ($N = 1$) когерентных структур разных размеров с верхней колмогоровской огибающей.

Если же разница между масштабами велика ($L_{0i}/L_{0\,i+1} > 20$-30), то сумма спектров имеет глубокий провал, в котором «обнажается» одна крупная структура с зависимостью $\sim æ^{-8/3}$. Такая ситуация соответствует кривым 1,2 на рис. 2. Турбулентность в этом случае называется когерентной.

Таким образом, как видно из рис. 2, если когерентные структуры имеют близкие размеры и «хорошо смешаны», то наблюдается (локальная) изотропия турбулентности, описываемая колмогоровским спектром. Если же в смеси одна из когерентных структур существенно больше других, то наблюдается анизотропия турбулентности, описываемая спектром когерентной турбулентности.

На рис. 3 приведен типичный экспериментальный спектр W и его теоретическая аппроксимация суммой четырех спектров одиночных

когерентных структур с разными внешними масштабами. Такие аппроксимации (а нами построено их несколько десятков) позволяют добиться неплохого согласия теории с экспериментом (это видно также и из рис. 3), как для колмогоровской, так и неколмогоровской турбулентности, даже в случаях часто регистрируемых в атмосфере ступенчатых (и многоступенчатых) инерционных интервалов.

Результаты [2 - 4] сложения экспериментальных данных для различных разнесенных когерентных структур, дающие в итоге колмогоровскую турбулентность, данные рис. 2 и 3, а также известные многочисленные результаты численных решений уравнений гидродинамики заставляют нас рассматривать когерентную структуру как основной базисный структурный элемент, из которых состоит турбулентность.

Когерентные структуры могут принимать различные формы (от уединенной упорядоченной вихревой структуры, типа ячейки Бенара, до систем периодически распределенных в пространстве гидродинамических возмущений, типа систем разнообразных валов и др.). Размеры порождающих структур (ячеек) в атмосфере могут отличаться друг от друга в 10^8 - 10^9 раз: от нескольких сантиметров (пристеночная турбулентность, термики) до нескольких тысяч километров (ячейки Ферреля и Гадлея). Часто более мелкие когерентные структуры оказываются вложенными в более крупные.

В атмосфере, из-за малой вязкости, процессы возникновения порождающих ячеек когерентных структур (уединенных волн) и их распада происходят обычно одновременно. Однако эти процессы могут быть и разнесены во времени (например, в длинных дорожках Кармана). Могут присутствовать также и обычные неуединенные волны (акустические, гравитационные и др.).

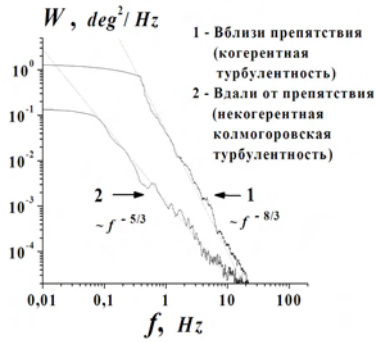


Рис. 1. Типичные спектры флуктуаций температуры W при обтекании крупных препятствий (в районе оси турбулентного следа).
1 - когерентная турбулентность вблизи препятствия,
2 - некогерентная колмогоровская турбулентность вдали от препятствия

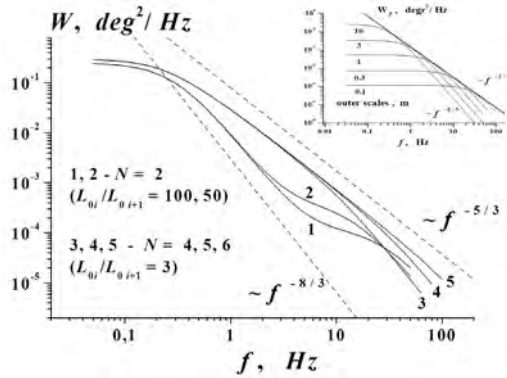


Рис. 2. Теоретические спектры W, являющиеся суммами спектров N различных когерентных структур.
1, 2 – сумма одной крупной и одной мелкой структур (N = 2); 3, 4, 5 - суммы N структур (N = 4, 5, 6) с последовательно уменьшающимися в 3 раза размерами.

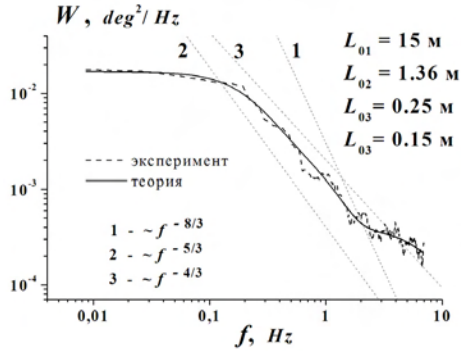


Рис. 3. Типичный спектр температуры W.
Штриховая линия – сглаженный экспериментальный спектр (Алтай, 29.06. 2006).
Сплошная линия – теоретическая сумма спектров четырех (N = 4) когерентных структур с разными L_{0i} (указаны справа)

1. Монин А.С., Яглом А.М. *Статистическая гидромеханика*. Т.1. М.: Наука, 1965. 639 С.; Т.2. М.: Наука, 1967, 720 С.
2. Носов В.В., Григорьев В. М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. *Астроклимат специализированных помещений Большого солнечного вакуумного телескопа*. Ч.1 // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 11. С. 1013-1021; Ч.2 // Оптика атмосферы и океана 2008. Т. 21, № 3. С. 207-217.
3. Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., et al., in ”Mathematical models of nonlinear phenomena”. Ed A. Nadykto et al. - N.Y.: Nova Science Publishers. 2011. Ch. 20 (”*Coherent structures in the turbulent atmosphere*”).
4. Носов В.В., Григорьев В. М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. *Когерентные структуры в турбулентной атмосфере*. Эксперимент и теория // Солнечно-земная физика, 2009. Вып. 14. С.97-113.
5. Носов В.В., Григорьев В. М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. *Рекомендации по выбору мест размещения наземных астрономических телескопов* // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1099-1110; Атмосферная когерентная турбулентность // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 753-759.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

П.Г. Стафеев[1, 2], Г.В. Бухлова[1], Н.П. Красненко[1, 2]
[1]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, krasnenko@imces.ru
[2]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск

Ультразвуковые метеорологические комплексы (УМК) широко используются для измерения метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы. Их основная особенность заключается в высокой частоте измерения метеопараметров (температуры и скорости ветра), что позволяет вычислять пульсационные и турбулентные характеристики атмосферы в месте расположения измерительной головки комплекса. В данной работе использован УМК оригинальной разработки, измеряющий температуру воздуха, скорость ветра (три компоненты), влажность и давление.

Проводилось исследование влияния подстилающей поверхности на измерения УМК. Для этого сравнивались измерения двух УМК, расположенных на транспортном средстве и на стационарной мачте над землей вблизи. Акустические головки комплексов находились на одинаковой высоте 5 м над землей, а датчики влажности и давления на высоте 2 м над основанием мачт. Высота транспортного средства составляла 2 м. Комплексы работали синхронно. По измеренным текущим значениям метеорологических параметров вычислялись характеристики турбулентности, а именно масштаб Монина – Обухова, структурные постоянные флуктуаций температуры, скорости ветра и акустического показателя преломления, а так же температурный градиент.

Анализ результатов показал, что данные по температуре воздуха, скорости и направлению ветра, структурным постоянным имеют совпадение времени наступления максимумов и минимумов, наблюдается синхронность хода. По температуре воздуха наблюдалось стабильное смещение до 2 градусов: над транспортным средством теплее, за счет нагрева его поверхности от работающего двигателя и солнца. По скорости ветра имеется расхождение до 2 м/с, здесь значения выше над транспортным средством. По направлению ветра совпадение данных хорошее. По структурной постоянной флуктуаций температуры встречались отдельные расхождения по величине до 5 раз. По давлению воздуха имеется превышение значений над транспортным средством до 5 – 7 мм рт. ст. По влажности воздуха: над транспортным средством имеется постоянное превышение (разница до 10 %). По структурной посто-

янной флуктуаций скорости ветра над транспортным средством наблюдаются в основном устойчивые заниженные значения (меньше в 2 – 4 раза, чем над землей). По структурной постоянной акустического показателя преломления наблюдаются различия данных также до 5 раз. По градиенту температуры: при больших отрицательных градиентах температуры над землей (неустойчивая стратификация атмосферы), над транспортным средством получаются меньшие значения того же знака (стратификация приближается к безразличной). При значениях градиента температуры над землей близких к нулевым (безразличная стратификация) или положительных (устойчивая стратификация) над транспортным средством имеется тенденция к отрицательному градиенту (неустойчивая стратификация). Содарные факсимильные записи температурной стратификации нижнего слоя атмосферы, полученные во время эксперимента, показывали в основном на неустойчивую стратификацию (отрицательный градиент температуры) в слое до 400 м (менялся в течение времени) и выше - на безразличную стратификацию с градиентом температуры близким к нулю. В отдельные моменты измерений наблюдалась устойчивая стратификация (положительный градиент температуры, наличие температурных инверсий: приземной и приподнятой).

Расхождения данных по величине можно объяснить влиянием различных типов подстилающих поверхностей, тепловых потоков над транспортным средством и тем, что метеокомплексы находились на некотором расстоянии друг от друга.

Низкая корреляция значений характеристик турбулентности, вычисленных по результатам измерений двумя УМК, говорит о высокой погрешности, вносимой транспортным средством.

Также вычислялись статистические характеристики и различные параметры температурной и ветровой турбулентности приземного слоя атмосферы, в т.ч. полная энергия турбулентных движений, потоки импульса, тепла, масштабы ветра, температуры, Монина-Обухова и др. Вычисляемых параметров, достаточно для оценивания динамического режима турбулентности в приземном слое атмосферы, в том числе для определения класса устойчивости атмосферы. При проведении исследований варьировалась частота и временной интервал осреднения исходных данных. Анализировалась устойчивость характеристик турбулентности в различных условиях измерений.

Методика проведения измерений и обработки данных заключалась в том, что по непрерывным суточным потокам текущих значений метеорологических величин (температуры и трех компонент скорости ветра), измеренных с максимальной частотой дискретизации 33 Гц, определя-

лись средние значения метеопараметров и турбулентные характеристики атмосферы при различном интервале времени осреднения.

Проанализировав поведение характеристик турбулентности в зависимости от частоты дискретизации измеряемых метеопараметров, получили, что их значения начинают стабилизироваться при частотах свыше 5 Гц. Это, в частности, наблюдается в зависимостях масштаба Монина – Обухова от частоты дискретизации данных, полученных при различных типах стратификации атмосферы.

На рис. 1 в качестве примера показано как при изменении времени осреднения данных меняется значение масштаба Монина – Обухова, когда в первые 1000 секунд преобладает отрицательный поток тепла, затем поток тепла меняет свой знак с отрицательного на положительный в течении следующих 1000 секунд, что соответствует безразличному типу стратификации, затем поток тепла становится положительным, и тип стратификации становится устойчивым.

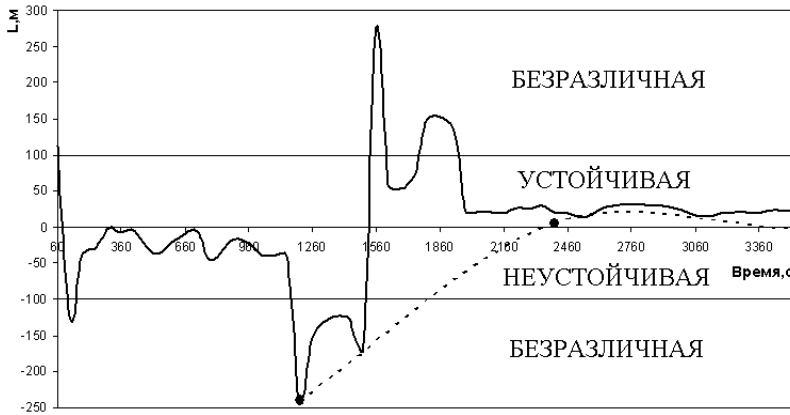


Рис. 1. Масштаб Монина – Обухова при переходе из неустойчивой стратификации в устойчивую

Сплошной линией показано изменение масштаба Монина – Обухова в зависимости от времени осреднения метеопараметров, пунктирной – значения масштаба Монина – Обухова, вычисленные с интервалом осреднения в 1200 с.

Значения же структурных постоянных скорости ветра и температуры ведут себя неустойчиво при малых интервалах осреднения и стабилизируются при различных типах стратификации по разному.

Проанализировав распределения вероятностей структурных постоянных флуктуаций температуры и скорости ветра для всех трех типов стратификации атмосферы, определили временные интервалы, в которых значения структурных постоянных ведут себя устойчиво. Получено, что для достоверного вычисления турбулентных параметров атмосферы необходимо производить измерения метеопараметров с частотой дискретизации более 5 Гц и временным интервалом осреднения около 20 мин.

Также проводилось восстановление высотных профилей T(z) и V(z) программным способом, на основе потока измерений УМК. При этом учитывалось, что в настоящее время в результате длительных исследований, проведенных в различных географических условиях, установлены модельные профили T(z) и V(z), выраженные через универсальные функции подобия от безразмерного параметра $\xi = z / L^*$. Можно заметить, что полученные для разных высот значения температуры воздуха в целом соответствуют значениям, вычисленным в реальном времени. Коэффициенты корреляции между экспериментальными и расчетными данными составляют 0,8-0,9 в случае безразличной и неустойчивой стратификаций. В случае устойчивой стратификации до высот 100 м, коэффициенты корреляции больше 0,8, а выше 100 м значения коэффициента корреляции уменьшаются.

Зависимости для скорости ветра отличаются сильнее, чем для температуры, особенно при неустойчивой стратификации. Кроме того, на распределение ветра с высотой, в реальных условиях влияет неоднородность подстилающей поверхности и нестационарность погодных условий.

РОЛЬ СПИРАЛЬНОСТИ В КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССАХ МГД ТУРБУЛЕНТНОСТИ

П.Г. Фрик, Р.А. Степанов
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, frick@icmm.ru

Действие динамо представляется основным механизмом генерации магнитных полей в большинстве астрофизических объектов. Проводящая среда, которая генерирует магнитное поле, в общем случае сильно турбулизована ($Re >> 1$) и характеризуется выраженным инерционным интервалом. Электрические свойства среды определяются числом Прандтля $Pm = \nu / \eta$, где ν и η — коэффициенты кинематической вязкости и магнитной диффузии. В жидких ядрах планет и конвективных зо-

нах звезд Pm <<1 , а в межзвездной среде и корональной плазме Pm >>1 . При прямом численном моделировании магнитогидродинамической (МГД) турбулентности условия Re >> 1 и существенное отличие Pm от единицы маловероятно достижимо в ближайшем будущем. Альтернативный подход заключается в использовании каскадных моделей турбулентности.

Каскадные модели, впервые предложенные А.М.Обуховым [1], зарекомендовали себя как эффективный инструмент исследования статистических свойств развитой мелкомасштабной турбулентности (см., например, [2]), описывающие процессы спектрального переноса в развитой турбулентности с помощью небольшого числа переменных, каждая из которых является коллективной характеристикой амплитуд пульсаций поля скорости и магнитного поля в некотором интервале волновых чисел. Уравнения для коллективных переменных записываются так, чтобы они воспроизводили «базовые» свойства исходных уравнений движения, а именно, имели те же интегралы движения и тот же вид нелинейности. В данной работе использовалась каскадная модель, предложенная в [3].

МГД турбулентность отличается от обычной турбулентности своими законами сохранения, что может приводить к принципиально иному характеру эволюции течений электропроводящей среды. При расчетах долговременного свободного вырождения показана возможность реализации двух сценариев эволюции системы при слабой вариации начального состояния. Ранее известный первый сценарий, характерный для большинства реализаций, соответствует быстрому накоплению перекрестной спиральности, что приводит к состоянию полной коррелированности магнитного поля и поля скорости. Следуя второму, более редкому, сценарию вырождения, система остается при слабом уровне перекрёстной спиральности и достигает существенно более низкого значения кинетической энергии. Впервые удалость установить, что второй сценарий вырождения обусловлен влиянием магнитной спиральности, которая блокирует часть магнитной энергии в крупномасштабной части спектра.

Моделирование МГД турбулентности стационарно поддерживаемой внешней силой показывает, что перекрестная спиральность в определенной степени блокирует каскад энергии, а магнитная спиральность способствует обратному каскаду.

1. Обухов А.М. // Известия АН, ФАО.-1971.-№7. С.695-704.
2. Фрик П.Г. *Турбулентность: подходы и модели*. –РХД, 2010. –332 с.
3. Мизёва И.А., Степанов Р.А., Фрик П.Г. // ДАН. –2009. –Т. 424, № 4. –С. 479-483.

II. Динамика атмосферы и климатической системы

КЛИМАТОЛОГИЯ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ И АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

М.Г. Акперов, И.И. Мохов
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, seid@mail.ru

Рассмотрены характеристики циклонов и антициклонов (количество, время жизни, интенсивность, размер) по данным различных типов реанализа с разным пространственным разрешением для внетропических широт Северного полушария (СП) в целом, для разных сезонов, а также для континентов и океанов.

Отмечены различные изменения характеристик внетропических циклонов и антициклонов в зависимости от пространственного разрешения данных, сезона и областей анти/циклогенеза.

Отмечены различные тенденции изменения интенсивных внетропических циклонов и антициклонов.

MOISTURE BUDGET OF NORTHERN EURASIA: UNCERTAINTIES, CHANGES AND IMPLICATIONS FOR HYDROLOGY OF SIBERIAN RIVERS

Vladimir A. Alexeev[1], Alexander I. Shiklomanov[2], Ipshita Majhi[3] and Pavel Ya. Groisman[4]
[1]International Arctic Research Center, University of Alaska, Fairbank, valexeev@arthur.iarc.uaf.edu
[2]University of New Hampshire
[3]University of Alaska, Fairbank, [4]UCAR scientist at NOAA

Warming of recent decades coincides with the overall increase in runoff from Siberian rivers to the Arctic Ocean. Significant changes in moisture budgets and contributing components have been observed. Changes in precipitation are usually considered as the primary cause of any alteration to the hydrological regime and this is often the default assumption. During the past

decade there were many studies to understand the effects of climate variability on the increasing discharge of large Eurasian rivers and characterizing the freshwater input into the Arctic Ocean. Most of them, however, have found that, increase in the annual river runoff across Siberia was not accompanied by the increase in annual precipitation. Our estimates based on "naturalized discharge records" (with removed local anthropogenic influence like reservoir regulation) showed that changes over the low flow period (fall-winter) account for about 80% of total documented changes in annual discharge to the Arctic Ocean from Eurasia.

Various products are used in order to assess uncertainties and suggest mechanisms of observed changes. Observations of precipitation are infamously difficult to correct, especially in the cold season. Observations of evaporation are extremely sparse and even more difficult to interpret. Reanalysis products offer a variety of options, including model-derived evaporation and precipitation fields obtained as a result of data assimilation and methods based on using the convergence of atmospheric moisture transport. Available direct observations and reanalysis products are compared against each other to see what kind of conclusions can or cannot be made about the mechanisms of observed change. We hypothesize that widely documented significant increase in air temperature across the North Eurasian pan-Arctic has significant impacts upon the hydrological regime and river discharge even without noticeable changes in annual precipitation. Changes in frozen moisture regime, along with deeper active layer, thinner river ice, earlier and faster spring snowmelt associated with regional warming are offered as the most prominent major drivers for the river runoff increase in recent decade

ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Алексеев Г.В.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, alexgv@aari.nw.ru

Исследована связь между атмосферной циркуляцией и изменениями приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) с использованием нового индекса циркуляции. Индекс основан на аналитической зависимости между колебаниями разности температуры воздуха над океаном и атмосферой и колебаниями зонального переноса в атмосфере в умеренных широтах в боксовой модели «океан-атмосфера-суша». Выполнены расчеты связи между индексом и средней температурой воздуха в разные месяцы и сезоны по данным трех массивов среднемесячной температуры воздуха за 1948-2010 г. и по данным глобальной модели ECHAM4. В

зимние месяцы эта связь описывает свыше 70% изменчивости средней температуры в умеренных широтах, до 50% в Северном полушарии и 40% на глобусе. Летом связь между индексом и средней температурой положительна и отражает до четверти изменчивости средней температуры. Корреляция средней температуры с индексами NAO и AO намного слабее и значима только зимой. Вклад усиления зональной циркуляции в повышение средней температуры воздуха зимой за 1968-2009 гг. составляет 75 % в умеренных широтах и 40% в Северном полушарии и на глобусе. По данным проекций модели ECHAM4 (сценарий A1B) зональная циркуляция будет определять более 74% потепления в Северном полушарии за 2001-2100 гг. Выполненное исследование показывает, что предложенный индекс является эффективным индикатором изменений температуры, вызванных изменениями зональной циркуляции антропогенной или естественной природы.

О ПРИЗНАКАХ И ПРИЧИНАХ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Анисимов М.В.[1], Бышев В.И.[1], Залесный В.Б.[2], Мошонкин С.Н.[2], Нейман В.Г.1, Романов Ю.А.[1], Серых И.В.[1]

[1]Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва

[2]Институт вычислительной математики РАН, Москва, LabByshev@ocean.ru

Выполнена оценка междекадной изменчивости некоторых основных характеристик глобальной климатической системы в пределах векового ряда инструментальных измерений параметров окружающей среды. Выдвигается и обосновывается гипотеза о том, что , физический механизм, генерирующий флуктуации климата на масштабе десятилетий, обладает свойствами автоколебательного процесса, квазициклически перераспределяющего тепловую энергию между океанами и материками через систему циркуляции атмосферы.

С помощью численного моделирования термодинамического состояния верхней толщи вод океана обнаружено, что источником импульса для возникновения автоколебаний в динамике климатической системы является возмущение термической структуры верхнего деятельного слоя океана, для которого характерна эпизодическая тепловая разгрузка в атмосферу под влиянием глубокой зимней плотностной конвекции. На примере региона Северной Атлантики показано, что пространственно-временные проявления этого автоколебательного процесса могут быть прослежены в виде междекадной фазовой изменчивости некоторых основных характеристик современного климата.

ПОЛЯРНОЕ УСИЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА. ОЦЕНКИ И МЕХАНИЗМЫ

Бекряев Р.В.[1,2], *Поляков И.В.*[3]
[1]Главная геофизическая обсерватория им. Воейкова, Санкт Петербург,
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт Петербург,
bekryaev@mail.ru
[2]Международный центр арктических исследований, Университет Аляски, Фербенкс, США

Процесс современного потепления, наблюдающийся в климатической системе северной полярной области, даже на фоне глобальных планетарных изменений выглядит весьма впечатляющим и охватывает практически все компоненты климата. Климатическая система Северной Полярной области (СПО) является одной из наиболее чувствительных частей глобальной климатической системы. Анализ наблюдений, а также результаты расчетов на основе совместных климатических моделей свидетельствуют о проявлениях так называемого полярного усиления, заключающегося как в увеличении отклика климатической системы высоких широт на внешние воздействия, так и в усилении внутренней изменчивости по сравнению с умеренными и тропическими широтами.

В настоящей работе рассматривается гипотеза (Bekryaev et al, 2010) о существовании двух механизмов формирования полярного усиления – региональном и глобальном. Региональный механизм формирования полярного усиления связан с реализацией лед (снег) – альбедной положительной обратной связи. Глобальный механизм полярного усиления по нашему мнению определяется нелинейной зависимостью упругости насыщения водяного пара от температуры воздуха, описываемой уравнением Клаузиуса-Клапейрона. В соответствии с этой зависимостью потепление климата сопровождается ростом меридионального переноса водяного пара в атмосфере, что неизбежно должно сопровождаться не только увеличением притока латентной энергии в высокие широты, но и усилением парникового эффекта в Арктике.

В работе рассматривается изменчивость приземной температуры воздуха, интегрального содержания водяного пара и компонент длинноволновой радиации на станциях Ню Алесунд и Барроу, характеризующих состояние климатической системы восточной и западной Арктики. Изучается взаимосвязь данных климатических характеристик и их долгопериодные изменения. Показано, что за последние два десятилетия произошёл значительный рост нисходящей длинноволновой радиации на подстилающей поверхности, что было обусловлено как увеличением содержания водяного пара, так и ростом количества общей облачности в полярной атмосфере.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОРОГРАФИЧЕСКИХ УСИЛЕНИЙ ВЕТРА НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАВКАЗА (НОВОРОССИЙСКАЯ БОРА) ПО ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ COSMO-RU ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ, ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Д.В. Блинов, В.Л. Перов, Б.Е. Песков, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина
Гидрометцентр России, perov@mecom.ru
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

В работе рассматривается прогноз сильного порывистого ветра (боры), наблюдаемого в холодное время года на южных склонах Кавказских гор в районе от Анапы до Туапсе, по негидростатической модели COSMO-Ru с горизонтальным разрешением 7.0 и 2.2 км. Проводится детальный анализ синоптической ситуации, приводящей к экстремально сильным ветрам на черноморском побережье. Дается сравнение прогнозируемых полей скорости и температуры с данными наблюдений. Делается анализ орографических усилений ветра на подветренной стороне хребта на основе гидравлического и волнового механизмов. Исследуется чувствительность модели к параметризации турбулентности для устойчиво стратифицированного пограничного слоя атмосферы.

ЛИНЕЙНЫЕ ТРЕНДЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 90 ЛЕТ НА ПРИМЕРЕ БАШКИРИИ

[1,2]Васильев Д.Ю., [1]Галимова Р.Г., [1]Гареев А.М., [2]Лукманов Р.Л.
[1]Башкирский государственный университет, Географический факультет
Кафедра гидрологии и геоэкологии, Уфа,
[2] Башкирский государственный аграрный университет, Энергетический факультет,
Кафедра физики, Уфа, vasilevdy_research@mail.ru

Используя классический статистический метод, регрессионного (линейного) анализа, были рассчитаны тренды в рядах приповерхностной температуры воздуха, за последние 90 лет. Базой для анализа послужили среднемесячные и среднегодовые значения температуры воздуха метеорологических станций, расположенных в различных, в климатическом и физико-географическом отношении, районах Башкирии: г. Уфа (1920-2005 г.г.), пос. Чишмы (1913-2005 г.г.), г. Бирск (1922-2005 г.г.),

с. Аксаково (1932-2005 г.г.), с. Архангельское (1934-2005 г.г.), с. Улу-Теляк (1934-2005 г.г.), пос. Инзер (1931-2005 г.г.), г. Белорецк (1932-2005 г.г.), с. Бакалы (1930-2005 г.г.), с. Раевский (1931-2005 г.г.). Рассчитанные коэффициенты линейных уравнений и сама предлагаемая математическая модель были оценены критериями Стьюдента и Фишера на значимость и адекватность (уровень значимости $\alpha = 0.1$).

НЕГИДРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГИДРОМЕТЕЦЕНТРА РОССИИ МЕЗОМАСШТАБНОГО КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ COSMO-RU

Р.М.Вильфанд, Г.С.Ривин, И.А.Розинкина,
Е.Д.Астахова, Д.В.Блинов, А.Ю.Бундель, В.Л.Перов, Г.В.Суркова,
Д.Ю.Алферов, Е.В.Казакова, А.А.Кирсанов, А.П.Ревокатова,
М.В.Шатунова, М.М.Чумаков
Гидрометцентр России, Москва, Gdaly.Rivin@mecom.ru

1. Работы Александра Михайловича Обухова по турбулентности, адаптации метеорологических полей, распространении волн и выявлению адиабатических инвариантов оказали и продолжают оказывать существенное влияние на понимание процессов мезомасштабных и крупномасштабных процессов в атмосфере и их учет в моделях атмосферы. А.М.Обухов непосредственно не занимался численным прогнозом погоды. Но интерес к этой задаче он проявил еще на заре развития численных моделей атмосферы: 55 лет тому назад он опубликовал статью [Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1957, N 9, с. 1133-1141], посвященную решению важной проблемы численного прогноза погоды – численному нахождению адвективных изменений метеорологических полей. Спустя 10 лет после этого в своей лекции ”Погода и турбулентность” на открытии пленарного заседания XIV Генеральной ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза (25 сентября 1967 г., Люцерн, Швейцария) А.М.Обухов рассмотрел другую важную проблему, с которой пришлось столкнуться в настоящее время – переход к моделированию процессов все меньшего масштаба. Конечно, еще далеко до рассмотренной в ней идеализированной ситуации с сетью наблюдений с расстояниями между соседними метеостанциями порядка 1 мм и прогнозом на срок, равный 1 с, но шаг по времени 15 с в оперативной модели атмосферы COSMO-Ru с шагом сетки 2,2 км уже реальность.

2. Система COSMO-Ru. В сентябре 2009 г. Росгидромет стал полноправным членом метеорологического консорциума COSMO (**Co**nsortium for **S**mall-scale **MO**deling, http://cosmo-model.org). Цель и обязан-

ность членов консорциума – совместно развивать и поддерживать общую оперативную негидростатическую модель атмосферы COSMO для ограниченной территории. В соответствии с правилами консорциума версия модели Росгидромета имеет называние COSMO-Ru. Метеослужбы - члены консорциума COSMO - для задания необходимых начальных и боковых граничных условий для прогноза по ограниченной территории получают в оперативном режиме прогностические поля системы глобального моделирования GME Немецкой метеорологической службы. С 29 февраля 2012 г. оперативная модель GME имеет 60 уровней по вертикали и шаг сетки 20 км (запланирована замена в 2014 г. квазистатической модели GME на негидростатическую глобальную модель ICON).

К настоящему времени на суперкомпьютерной системе Росгидромета в Москве (для всех указанных ниже территорий) и Новосибирске (только для второй территории) для слоя атмосферы толщиной 23 км и деятельного слоя земли толщиной 7 м разработана и функционирует технологическая линия системы COSMO-Ru для следующих территорий:

- ✓ Центральной и Восточной Европы, Уралу и части Западной Сибири (с запада на восток от Франции до Новосибирской области и с севера на юг от Новой Земли до Ливана), сетка 700×620×40 с шагом h=7 км, шаг по времени Δt=40 с, прогноз на 78 часов;
- ✓ часть ЕТР, Урала и Сибири, сетка 360×280×40 с h=14 км, Δt=80 с, прогноз на 78 часов;
- ✓ часть Южного ФО (Федерального округа), прилегающая к Черному и Азовскому морям, сетка 420×470×50 с h=2,2 км, Δt=15 с, прогноз на 42 часа;
- ✓ Центрального ФО, сетка 420×470×50 с h=2,2 км, Δt=15 с, прогноз на 24 часа.

3. Результаты численного прогноза погоды с помощью системы COSMO-Ru ежедневно 4 раза в сутки по начальным данным 00, 06, 12 и 18 час. ВКВ подготавливаются и пересылаются пользователям на серверы в виде файлов в коде GRIB (в различных системах вертикальных координат и различного состава в зависимости от запросов пользователей), в виде метеорологических карт (порядка 3000 карт в сутки) и метеограмм (примерно 1000 в сутки) пересылаются по электронной почте и частично выкладываются на сайтах Росгидромета, ФБГУ Гидрометцентр России и ФБГУ ”СибНИГМИ”. Численные прогнозы COSMO-Ru проводятся параллельно прогнозам по модели GME со сдвигом примерно 10 мин. В настоящее время при параллельном использовании 720 процессоров суперкомпьютера SGI Altix 4700 оперативные прогнозы на 78 час для сетки 700×620×40 с шагом h=7 км требуют примерно 30 мин. процессорного времени. Рассылка всех карт, метеограмм и файлов для

2-х первых территорий заканчивается через 3 час. 45 мин. после срока наблюдения.

4. **Работы, проводимые Гидрометцентр России по развитию COSMO-Ru**:

- ✓ развитие системы моделирования COSMO (физические и химические процессы в атмосфере и деятельном слое суши, включая снежный покров, усвоение данных, ансамбли, верификация, статистическая коррекция);
- ✓ разработка технологической линии, включая препроцессинг и пост-процессинг (циклическая архивация, визуализация, подготовка и распространение результатов);
- ✓ работа по подготовке к метеорологическому обслуживанию важнейших мероприятий в стране, например, Универсиада в Казани в 2013 г., Зимняя олимпиада Сочи-2014);
- ✓ подготовка новой конфигурации для прогнозирования по всей территории России.

ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ МАСС И ПЕРЕНОС АНТРОПОГЕННЫХ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РОССИЙСКУЮ АРКТИКУ:25-ЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

А.А. Виноградова[1], *Т.Я Пономарева*[2]
[1] Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва,
anvinograd@yandex.ru
[2] Гидрометцентр России, Москва

Вопросы загрязнения Арктики вот уже три десятилетия интересуют научную общественность и политиков, а в последние 10 лет и более широкий круг населения, – в связи с возможными экономическими и экологическими аспектами этого явления в условиях заметных климатических изменений на нашей планете. Данная работа обобщает исследования авторов о переносе воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в Российскую Арктику, начатые в середине 1980-х годов [1-4]. Условия циркуляции воздушных масс в нижней тропосфере анализируются по многолетним (1985-2010) массивам траекторий переноса воздуха, рассчитанных на базе метеорологической и синоптической информации Гидрометцентра России. Неизменность методик получения, обработки и классификации исходной информации, а также подходов к расчетам переноса аэрозольных примесей обеспечивает прозрачность и надежность процедуры «наращивания и сшивания» геофизических данных и сравнения результатов.

Изучается перенос воздушных масс и антропогенных тяжёлых металлов (ТМ) к трем пунктам в Российской Арктике, расположенным на Земле Франца Иосифа, Северной Земле и о. Врангеля, по 5-суточным траекториям распространения воздуха на изобарических уровнях 850 и 925 гПа. Выявлены пространственные, сезонные и долговременные закономерности и особенности в процессах переноса воздушных масс в Российскую Арктику.

Распространение пассивной аэрозольной примеси моделируется для субмикронных частиц при равномерном распределении в пределах приземного слоя перемешивания с учетом горизонтального расплывания воздушного потока. Эмиссии источников и скорости осаждения антропогенных ТМ на поверхность соответствуют наиболее современным данным, опубликованным в литературе.

Изменения циркуляции атмосферы за рассматриваемый 25-летний период привели к существенному изменению качественного состава атмосферного воздуха на северных островах Евразии: воздух стал более морским. Особенно это характерно для центрального и тихоокеанского секторов Российской Арктики. Этот эффект должен быть наиболее заметен летом и в начале осени, когда поверхности суши и океана не закрыты снегом и льдом и континентальный и морской воздух принципиально отличаются по составу. Обнаруженные сдвиги могут повлиять на состав почв, речных и озерных вод, на условия существования сухопутной флоры и фауны Арктики.

В 2000-х годах изменения циркуляции атмосферы на севере Евразии уже не приводили к заметному уменьшению вкладов антропогенных источников в загрязнение окружающей среды Российской Арктики, как это было в 80-х и 90-х годах прошлого века. Долговременные изменения уровня загрязнения окружающей среды в Арктике в последние годы определялись в основном изменениями эмиссии антропогенных источников.

Оценены средние (за 10-летия) антропогенные концентрации в воздухе и потоки на поверхность тяжелых металлов (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu) в разных районах Российской Арктики, а также их сезонные и долговременные вариации. Полученные результаты могут быть использованы при изучении среднего антропогенного воздействия на окружающую среду, а также долговременных процессов и вариаций содержания ТМ в наземных средах, объектах и экосистемах в Российской Арктике.

1. Vinogradova A.A. *Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer* // Atm. Environ. 2000. V. 34. Nos. 29-30. P. 5151-5160.

2. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. *Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике* // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 6. С. 761- 770.
3. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. *Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 г.* // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 471-480.
4. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. *Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986-2010 гг.)* // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 475-483.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ МЕТЕОПОЛЕЙ: КАК ИХ ОЦЕНИВАТЬ И КАКАЯ ОТ НИХ ПОЛЬЗА

В.А.Гордин
НИУ ВШЭ, Гидрометцентр России, Москва, vagordin@mail.ru

При «лобовых» алгоритмах оценивания корреляционных матриц векторных случайных величин (КМ) или корреляционных функций случайных процессов и случайных полей (КФ) по архиву с пропусками результат такого оценивания может не обладать свойством положительной определенности. Вариационный алгоритм, использующий теорию возмущений самосопряженных операторов, позволяет найти минимальную поправку K' к КМ: $K = K_* + K'$, обеспечивающую выполнение условия $Spec[K] \geq \varepsilon > 0$. Аналогичную процедуру можно применять и для КФ.

Для КФ однородных и изотропных скалярных (геопотенциал и температура) и векторного (горизонтальный ветер) полей на плоскости, зависящих только от расстояния r между парой точек, используется блочное представление

$$K(r) = \begin{pmatrix} K^{HH}(r) & K^{HT}(r) & K^{Hw_L}(r) & K^{Hw_T}(r) \\ K^{TH}(r) & K^{TT}(r) & K^{Tw_L}(r) & K^{Tw_T}(r) \\ K^{w_L H}(r) & K^{w_L T}(r) & K^{w_L w_L}(r) & K^{w_L w_T}(r) \\ K^{w_T H}(r) & K^{w_T T}(r) & K^{w_T w_L}(r) & K^{w_T w_T}(r) \end{pmatrix},$$

где каждый размерность каждого блока равна числу уровней по вертикали (в нашем случае 15). Для элементов этих блоков используется дискретная аппроксимация (сумма вместо интеграла) преобразования Фурье – Бесселя.

Алгоритм оценивания состоял из нескольких этапов. Сначала по архиву аэрологических наблюдений на 15 стандартных уровнях оценивались авто- и кросскорреляционные функции, составляющие симметричную матричнозначную (порядок матрицы *N* равен 4x15=60) функцию *G=G(r)*. Элементы матрицы - ступенчатые функции горизонтальной переменной *r* с шагом 50 км. Затем искалась матричнозначная функция - линейная комбинация (*j=1,2,3*) функций Бесселя $J_0(\xi_j r)$ нулевого порядка (для скалярных блоков) или производных функций Бесселя (для векторных или смешанных блоков), минимально отличающаяся от *G(r),* причем минимизация происходит попеременно по положительным масштабным множителям ξ_j и матрицам коэффициентов A_j порядка *N*. Оценки проводились на глобальном архиве аэрологических наблюдений за 38 лет с разделением по месяцам и по широтным поясам.

Для оценки погрешности выполнения гипотезы изотропности реальных метеополей по горизонтальным переменным рассмотрим двумерный метрический тензор $g_{ij}dx^i dx^j$, $i, j = 1, 2$ и по данным аэрологических наблюдений оценим, при каких значениях коэффициентов $g_{ij} = g_{ij}(p, \varphi, t)$, где p – давление, φ - широта, t – номер месяца, поле оказывается наиболее близким к изотропному? Для ответа на этот вопрос окрестность первой из пары точек разбиваем в метрике с тензором $g_{ij} = g_{ij}(p, \varphi, t)$, на секторы с шагом 15° и оцениваем анизотропию КФ. Затем подбираем «наилучший в смысле изотропности» тензор $g_{ij} = g_{ij}(p, \varphi, t)$. Наибольшие отклонения тензора от единичного (обычной метрики на двумерной сфере) наблюдались в тропической стратосфере.

Для уравнений газовой динамики возможны два типа разрывов: ударные волны и контактные разрывы, которые в динамике атмосферы интерпретируются как атмосферные фронты. Для неидеальной, вязкой атмосферы вместо кусочно-гладких поверхностей контактных разрывов наблюдаются зоны шириной, как правило, в несколько десятков километров. На них наблюдаются большие градиенты температуры и большие значения сдвига ветра, а также большая кривизна графика геопотенциала. При построении поверхностей атмосферных фронтов по данным наблюдений или данным расчетов прогностических схем необходимо решить, какой вес придавать каждому из этих предикторов? Разобьем ансамбль пар наблюдений на два кластера: пары, разделенные ат-

мосферным фронтом, и пары, принадлежащие одной и той же синоптической массе воздуха. Затем оценим КФ независимо для каждого из этих кластеров. Чем более они различаются (скажем, в норме $L^2[\mathbb{R}_+]$), тем лучше алгоритм построения фронтов, по которому производится разбиение на кластеры.

КФ, построенные по полям, полученным в результате интегрирования модели циркуляции атмосферы, можно сравнивать с КФ, построенными по данным наблюдений, и таким образом оценивать качество самой модели и отлаживать ее.

КФ для отклонений метеонаблюдений от прогностических (на срок наблюдения) метеополей используются для оптимальной интерполяции из точек наблюдения в узлы регулярной сетки для последующего интегрирования моделей прогноза погоды.

1.О.А.Алдухов, Ф.Л.Быков, В.А.Гордин. *Крупномасштабные трехмерные корреляционные функции для атмосферы Земли*. Ярославский педагогический вестник, 2011. № 4. С. 36-43.
2.О.А.Алдухов, В.А.Гордин. *Трехмерные корреляционные функции основных аэрологических величин*. Изв. РАН, сер. ``Физика атмосферы и океана", 2001, 37(1), стр.3-23.
3.О.А.Алдухов, В.А.Гордин. *Оценки анизотропии корреляционной структуры полей метеорологических величин по наблюдениям глобальной аэрологической сети*. Изв. РАН, сер. ``Физика атмосферы и океана", 2005, 41(3), стр.399-409.
4.Ф.Л.Быков, В.А.Гордин. *Трехмерный объективный анализ структуры атмосферных фронтов*. Изв. РАН, сер. ``Физика атмосферы и океана" , 2012. № 48(2). С. 172—188.
5.Ф.Л.Быков, В.А.Гордин. *Атмосферные фронты и осадки*. Тр. Гидрометцентра РФ, 2012, С.184-194.
6.В.А.Гордин. *Как это посчитать? Обработка метеорологической информации на компьютере*. М., МЦНМО, 2005.
7.В.А.Гордин. *Математика, компьютер, прогноз погоды и другие сценарии математической физики*. ФИЗМАТЛИТ, 2010, 2013.
8.Н.Е.Кочин. *Собрание сочинений*, т.1, М., АН СССР, 1949.
9.А.С.Монин, А.М.Яглом. *Статистическая гидромеханика*, т.2, 1996, М., ``Наука".

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ МИРОВОГО ОКЕАНА И ЕЁ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В 1948-2007 гг.

Гусев А.В., Дианский Н.А.
Институт вычислительной математики РАН, Москва, anatoly.v.gusev@gmail.com

В работе представлены результаты расчёта глобальной циркуляции океана и ее межгодовой изменчивости за период 1948-2007 гг. Расчёт

проводился с помощью сигма-модели общей циркуляции океана ИВМ РАН, получившая в международной практике название INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Для задания реалистичного атмосферного воздействия использовались данные из базы CORE, подготовленной в институте GFDL на основе реанализа NCEP/NCAR. Показано существенное уменьшение площади морского льда в Северном Ледовитом океане, соответствующее данным наблюдений. Ярко выражена отрицательная обратная связь в климатической системе Земли, направленная на уменьшение внешнего воздействия, вызванного в последние десятилетия, в основном, антропогенным фактором. Так, в 1990-х гг. выявлено заметное падение интенсивности Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ) и меридионального переноса тепла (МПТ) в океане. Это падение сопровождается ростом индекса Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), характеризующего температуру поверхности океана. Помимо внешнего антропогенного воздействия, выявлено влияние собственной динамики океана на его термохалинное состояние, которое ввиду большой термической инерцией Мирового океана происходит с задержкой около 10 лет. Так, минимумы индексов АТХЦ и МПТ в 1960-х гг. сопровождаются минимумом индекса АМО в 1970-х гг., а минимумы индексов АТХЦ и МПТ в 1990-х гг. сопровождаются минимумом индекса АМО в 2000-х гг.

РОЛЬ КОЛЕБАНИЙ МАДДЕНА-ДЖУЛИАНА И ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ВОЛН РОССБИ В МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЬНИНЬО.

Дарья Гущина[1], Борис Девитт[2].

[1] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический факультет, Москва, dasha155@mail.ru

[2] Лаборатория геофизики и спутниковой океанографии (LEGOS), Тулуза, Франция

Атмосферные возмущения внутрисезонного масштаба или внутрисезонная тропическая изменчивость (ВТИ) являются одним из важнейших звеньев атмосферной циркуляции в тропиках. В них, как правило, выделяют две основных моды – низкочастотную, представленную колебаниями Маддена-Джулиана (MJO) и высокочастотную, представленную экваториальными конвективно связанными волнами Россби и Кельвина, которые могут рассматриваться как стохастическая мода по сравнению с намного более медленными процессами в океане. ВТИ оказывает влияние на широкий спектр климатических феноменов в тропических широтах – от Индийского муссона до тропических циклонов. В том

числе ВТИ может способствовать генерации Эль-Ниньо и оказывать влияние на низкочастотную модификацию цикла ЭНЮК на масштабах десятилетий.

Недавние исследования выявили существование двух различных типов Эль-Ниньо. Классическое, или восточно-тихоокеанское Эль-Ниньо (EP), развивается на востоке Тихого океана, тогда как центрально тихоокеанское Эль-Ниньо, или Эль-Ниньо Модоки (CP), характеризуется максимальными аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в центре Тихого океана. Второй тип Эль-Ниньо наблюдался значительно чаще в последние десятилетия, то есть в период, когда отмечалось общее потепление поверхностных вод на западе Тихого океана в области так называемого «теплого бассейна», которое представляет собой проявление глобального изменения климата. Максимальная интенсивность ВТИ также приурочена к району «теплого бассейна», и именно в этом регионе реализуется вынуждающее воздействие колебаний Маддена-Джулиана и экваториальных волн Россби на волновые процессы в поверхностном слое океана. В связи с этим высказывается предположение, что изменение пространственно-временных характеристик ВТИ может являться одной из причин, определяющих формирование первого или второго типа Эль-Ниньо. С другой стороны, два типа Эль-Ниньо отличаются амплитудой, интенсивностью роста и локализацией аномалий ТПО, что может оказывать обратное воздействие на характеристики ВТИ.

В настоящем исследовании рассмотрены характеристики колебаний Маддена-Джулиана и экваториальных волн Россби и Кельвина, наблюдающиеся в тропической атмосфере в периоды двух различных Эль-Ниньо. Анализируются как данные наблюдений, так и результаты моделей проекта CMIP5. Показано, что вклад ВТИ в механизм ЭНЮК существенно различается для EP и CP Эль-Ниньо. Для восточно-тихоокеанского Эль-Ниньо MJO и экваториальные волны Россби играют роль триггера, тогда как в период Эль-Ниньо Модоки они способствуют сохранению аномалий в океане и атмосфере уже после кульминации явления. Результаты, полученные по моделям, в целом согласуются с наблюдениями, при этом использование более длинного временного ряда позволяет существенно повысить статистическую значимость различий.

О НЕКОТОРЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ТЕОРИИ КЛИМАТА

В.П. Дымников

Институт вычислительной математики РАН, Москва

В докладе рассматриваются некоторые современные задачи математической геофизической гидродинамики (в частности математической

теории климата) - глобальная разрешимость полных гидростатических уравнений динамики атмосферы и океана, существование аттракторов и оценки их размерности, сходимость решений конечномерных аппроксимаций к решениям исходных дифференциальных уравнений. Следуя определению климата как ансамбля состояний, проходимых климатической системой за большой период времени, проводится анализ возможности исследования одной из центральных задач теории климата - задачи чувствительности климата к малым внешним воздействиям на основе исследования устойчивости аттрактора исходной системы, как множества и меры на нем, к малым постоянно действующим возмущениям. Показывается, что задача об устойчивости климата решается проще при формулировании модели климата на основе динамико-стохастических уравнений. Кратко обсуждаются результаты исследований в данном направлении. В рамках динамико-стохастического подхода обосновывается методика построения оператора отклика климатической модели к малым внешним воздействиям, приводятся некоторые результаты численных экспериментов.

НЕГАУССОВОСТЬ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ

Елисеев А.В.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва,
eliseev.alexey.v@gmail.com

По данным реанализа ERA-40 для 1976-2002 гг. оценены характеристики гауссовости (асимметрия функции распределения и третьи центральные моменты) синоптических (с временными масштабами 2.5-6.0 сут.) вариаций горизонтального ветра, температуры, вертикальной скорости и удельной влажности в эйлеровых координатах. Для всех указанных переменных выявлено, что асимметрия функции распределения статистически значимо отлична от нуля в регионах генерации штормтреков. В этих регионах ненулевые значения асимметрии для вертикальной скорости, температуры и удельной влажности выявляются во всей толще свободной тропосферы, тогда как для горизонтальных компонент ветра - только в нижней части свободной тропосферы. Это соответствует существенному отличию характеристик распределения вероятности синоптических вариаций от гауссовой статистики. Сделана также оценка вклада центральных третьих моментов в уравнения генерации синоптической кинетической энергии и синоптических меридиональных потоков тепла и влаги. Этот вклад оказался значительным в

регионах шторм-треков зимой соответствующего полушария. При этом основную роль играет собственная горизонтальная адвекция синоптических движений, тогда как вклад третьих моментов, включающих в себя вертикальную скорость или связанных с метрическими членами уравнений, мал.

«АТЛАНТИФИКАЦИЯ» СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА: МИФ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

Иванов В.В.[1,2], *Алексеев В.А.*[2,3], *Репина И.А.*[3,4,5]
[1]Арктический и антарктический научно исследовательский институт, Санкт-Петербург, vladimir.ivanov@aari.ru
[2]Международный Арктический научный центр, университет Аляски, Фербенкс, США
[3]Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва,
[4]Институт космических исследований РАН, Москва,
[5]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,

Одной из глобальных проблем, стоящих сегодня перед человечеством, является меняющийся планетарный климат. Несмотря на то, что взгляды ученых на первопричины наблюдаемых изменений климата весьма различны, факт наличия самих изменений сомнений не вызывает. Представляет большой научный и практический интерес количественная оценка современного состояния параметров климатической системы Земли, а также обоснованный прогноз этих параметров на последующие десятилетия. В этой связи Арктика занимает особое место, как индикатор происходящих изменений, вследствие известного эффекта полярного усиления. Знаковым проявлением меняющегося климата Земли является резкое увеличение свободной ото льда площади в Северном Ледовитом океане (СЛО) в летний сезон, произошедшее в начале 2000-х годов. После 2007-го года ледяной покров на большей части СЛО стал сезонным, т.е. площадь однолетнего льда стала устойчиво превышать площадь многолетнего.

Необходимо подчеркнуть, что динамика летнего очищения ото льда в 2000-е годы весьма неоднородна. В первой половине 2000-х годов наиболее заметное уменьшение летней площади ледяного покрова наблюдалось в тихоокеанском секторе СЛО. Так, в 2007 году аномалия летней площади льда на 85% была обусловлена уменьшением площади льда в тихоокеанском секторе и лишь на 15% - в атлантическом. В 2012 году это соотношение изменилось в сторону выравнивания указанных площадей. Совместный анализ временных рядов параметров ледяного

покрова, атмосферы и океана в атлантическом секторе Арктики позволяет предположить, что возрастание сезонности ледяного покрова СЛО привело к усилению роли атлантической воды (АВ) в уменьшении объема льда – так называемой «атлантификации» СЛО. Применительно к зиме 2012-2013 гг. этот процесс проиллюстрирован на рис. 1.

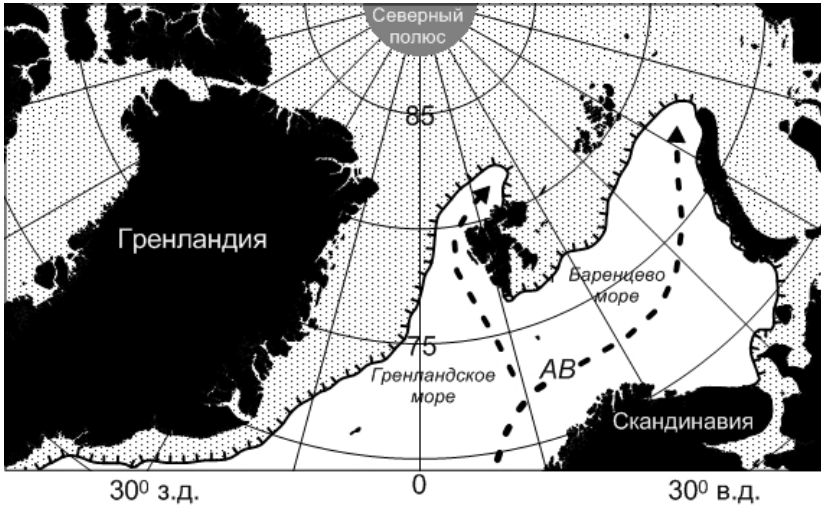


Рис. 1. Распространение ледяного покрова 1-10 февраля 2013 г. (http://nsidc.org/data/nsidc-0051.html). Стредками показаны траектории переноса АВ.

При дальнейшем уменьшении летнего ледяного покрова, атлантические воды, поступающие через пролив Фрама и через Баренцево море, будут медленнее терять свое тепло в силу того, что теплопотери на таяние льда заметно уменьшатся. В результате, АВ, как поверхностная водная масса с положительной температурой, сможет проникнуть в Арктический бассейн на значительно большее расстояние, чем наблюдавшееся в среднем в 20-м веке. Более интенсивный летний прогрев верхнего квазиодородного слоя за счет пониженной ледовитости, может на каком-то этапе привести к ситуации, когда поступающая с юга АВ сольется с прогретым верхним квазиоднородным слоем (т.е. сезонный термоклин заметно ослабнет или даже сменит знак). Следствием этого может стать резкое (на порядок величины) возрастание глубины зимнего конвективного перемешивания вдоль траектории распространения АВ, в результате чего возможна ситуация, наблюдавшаяся в климатических условиях 20-го века в Норвежском море и в западной части Барен-

цева моря и наблюдаемая сейчас на большей части Баренцева моря: круглогодично безледный режим, поддерживаемый интенсивной теплоотдачей из океана в атмосферу. При сохранении существующих тенденций в параметрах морского льда формирование аналогичных условий можно в ближайшие несколько лет ожидать в котловине Нансена от пролива Фрама до Земли Франца-Иосифа, а возможно и до архипелага Северная Земля, т.е. усиления «атлантификации» СЛО.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ШТОРМ – ТРЕКОВ, МЕРИДИОНАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ВЛАГИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

В. Крупчатников[1,2], Ю. Мартынова[1,3]

[1] Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, vkrupchatnikov@yandex.ru

[2] Новосибирский государственный университет, Новосибирск,

[3] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Работа посвящена исследованию динамики шторм-треков при глобальном изменении климата. С помощью стандартного полосового фильтра [1], из ежесуточных данных моделирования выделяются нестационарные вихри с периодами 2-8 суток, на основе которых строятся статистики для сравнения различных сценариев эволюции климата. В данной работе рассматривается комбинированный сценарий RCP 8.5, в соответствии с протоколом CMIP5 роста CO_2 до 3000 года, а после 3000 г. концентрация углекислого газа убывает со временем, возвращаясь к доиндустриальному значению.

Из анализа результатов моделирования климата XXI века по сценариям IPCC [2], следует, что циклоническая активность в средней тропосфере увеличивается, увеличивается их интенсивность [3,4], это может быть связано с увеличением меридионального градиента температуры в средней тропосфере. В то же время, падает частота циклонов в шторм - треках убывает [5], это можно объяснить ослаблением меридионального градиента температуры у поверхности. В сообщении также обсуждаются физические механизмы формирования струйных течений в шторм – треках в условиях бароклинной турбулентности средних широт.

В работе приводятся результаты моделирования динамики шторм - треков на основе модели климатической системы [6] по сценарию RCP 8.5, дается анализ изменений структуры шторм – треков и сравнение с результатами моделирования по ансамблю моделей IPCC.

В последние годы динамика морского льда в Арктическом бассейне указывает на то, что покров морского льда быстро убывает, а результаты моделирования показывают, что эта тенденция сохранится в будущем. Остается открытым вопрос будет ли процесс исчезновения морского льда в летний сезон и существенное его сокращение в зимний сезон необратимым, т.е. когда морской лед будет сезонным явлением. Представленные результаты моделирования, по указанному выше сценарию, говорят о том, что вероятность этого явления невелика.

1. Blackmon M.L. *A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere* // J. Atmos. Sci.1976. V. 33, № 8, pp. 1607-1623.
2. IPCC: 2007. *Climate change. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
3. Ulbrich, U., J. G. Pinto, H. Kupfer, G. C. Leckebusch, T. Spangehl, M. Reyers. *Changing Northern Hemisphere storm tracks in an ensemble of IPCC climate change simulations*. // J. Clim., 2008, **21**, pp. 1669–1679.
4. Bengtsson, L., K. I. Hodges, E. Roeckner. *Storm tracks and climate change* // J. Clim.,2006, **19**, pp. 3518–3543.
5. Lambert, S. J., and J. C. Fyfe. *Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: Results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise* // Clim. Dyn., 2006, **26**, pp. 713–728.
6. Fraedrich K., Jansen H., Kirk E., Luksch U., Lunkeit F. *The Planet Simulator: Towards a user friendly model*. // Meteorologische Zeitschrift, 2005. V. **14**, N. 3, P. 299–304.

КЛИМАТ МИРОВОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПОПЛАВКОВ АРГО 2005-2013 ГОДОВ

Лебедев К.В.[1], DeCarlo S.[2], Hacker P.[2], Maximenko N.[2], Potemra J.[2]
[1]*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, KLebedev@ocean.ru*
[2]*IPRC, University of Hawaii, Honolulu, HI, USA*

Наступление в конце XX века эры спутниковых наблюдений за поверхностью океана и развитие в первые годы XXI века проекта Арго, направленного на сбор с использованием спутников информации о толще океана, дает уникальные возможности непрерывного мониторинга состояния Мирового океана. На основе данных спутниковых наблюдений оцениваются различные гидрофизические и биологические параметры поверхностного слоя океана (температура, соленость, возмущение уровенной поверхности, волнение, цветность, концентрация хлорофилла и т.д.). В частности, возмущение уровенной поверхности океана,

в значительной степени связанное с динамикой всей толщи океана, измеряется со спутников-альтиметров.

Начиная с 2005 года, измерения с помощью поплавков Арго стали вестись на большей части акватории Мирового океана. Заявленного при разработке программы Арго уровня покрытия в 3000 одновременно работающих поплавков (в среднем 1 поплавок на трехградусный «квадрат») удалось достичь в ноябре 2007 года. По состоянию на сегодня около 3600 поплавков Арго осуществляют автономное зондирование верхней двухкилометровой толщи океана от Антарктики до Шпицбергена с 10-дневным временным интервалом. Благодаря этому база данных по температуре и солености Мирового океана ежемесячно увеличивается на десять тысяч полноценных профилей. К этому следует добавить десять тысяч лагранжевых траекторий, позволяющих оценивать скорости перемещения поплавков во время нахождения на поверхности и на глубине дрейфа (как правило, 1000 метров). Постоянно пополняющиеся массивы измерений позволяют успешно решать задачи реконструкции и мониторинга состояния океана в режиме, близком к реальному времени, и исследовать особенности океанской динамики и ее изменчивости. Огромное количество профилей, накопленных в рамках программы Арго за период с 2005 по 2013 год (общее число измеренных профилей приближается к одному миллиону), позволяет получить разумные оценки климатического состояния Мирового океана для последнего десятилетия и дать оценку текущим внутриклиматическим трендам.

Для реконструкции и мониторинга гидрофизических полей реального океана были проведены расчеты методом вариационной интерполяции на регулярную одноградусную сетку полей температуры, солености и геострофической скорости (поля давления) по данным профилей Арго, траекторий поплавков и спутниковой альтиметрии. Метод вариационной интерполяции минимизирует отклонение рассчитанных в узлах регулярной сетки полей от нерегулярно расположенных измерений таким образом, что полученное оптимальное решение проходит максимально близко к данным измерений. Выполненные расчеты охватывают более чем 8-летний период с 2005 по 2013 год и представлены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями.

РЕАКЦИЯ АТМОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НА СОКРАЩЕНИЕ ПЛОЩАДИ МОРСКОГО ЛЬДА В АРКТИКЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ

Мелешко В.П., Байдин А.А.
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
Санкт- Петербург, vpmeleshko@mail.ru

Данные наблюдений показывают, что наиболее заметное региональное потепление климата происходит в Арктике, которое особенно проявляется в быстром сокращении площади ледяного покрова в конце лета и росте температуры воздуха в пограничном слое атмосферы осенью и зимой. В докладе рассматривается влияние сокращения площади морского льда за период с начала спутниковых наблюдений (1979 год) по настоящее время на крупномасштабную циркуляцию атмосферы и аномальные режимы погоды. Исследование проводится с глобальной моделью атмосферы ГГО T63L25, в которой в качестве граничных условий задаются наблюдаемые и изменяющиеся во времени температура поверхности океанов и концентрация ледяного покрова в течение 1980-1989 гг. и 2002-2011 гг. Поскольку естественная пространственно-временная изменчивость атмосферной циркуляции в высоких и средних широтах достаточно большая в холодное время года, а рассматриваемые периоды относительно короткие, для получения значимых климатических изменений в атмосфере строились модельные ансамбли достаточно большого размера. Проводится сравнительный анализ реакции нижней тропосферы в Арктике на изменения площади ледяного покрова по модельным расчетам и данным реанализа. Представлены ансамблевые расчеты циркуляции и термического режима атмосферы в Арктике и Евроазиатской части России осенью и зимой, когда аномалии ледяного покрова оказывают наибольшее влияние на атмосферу. Особое внимание уделяется рассмотрению изменения режимов погоды в прибрежных зонах, примыкающих к двум крупным районам сокращения ледяного покрова – в Баренцевом/Карском морях зимой и восточной Арктике осенью. Исследуются аномальные характеристики климата: температура воздуха, давление на уровне моря, скорость ветра, осадки (твердые и жидкие) и их изменчивость. Оценивается статистическая значимость рассчитанных характеристик и их зависимость от размера принятого модельного ансамбля. Обсуждаются вопросы влияния сокращения ледяного покрова в Арктике на процессы атмосферной циркуляции средних широт.

ОСОБЕННОСТИ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ВАРИАЦИЙ МЕТЕОЭЛЕМЕНТОВ

Мельников В.А., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И.
Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, vmelnikov@ocean.ru

Хорошо известно, что изменчивость метеоэлементов описывается спадающим по частоте спектром с отдельными пиками на частотах, где имеются квази-гармонические внешние воздействия. Т.е. спектры по структуре обычно состоят из максимумов групп годовых и суточных колебаний с обертонами плюс "красный" фон. Кроме того, известно также, что в вариациях параметров, описывающих динамическую атмосферную систему, повсеместно проявляется свойство самоподобия, когда изучаемый сигнал на больших масштабах (временных и пространственных) является растянутой копией сигнала на малых масштабах. Доминирующей по амплитуде составляющей изменчивости являются годовые колебания (в умеренных широтах). Кроме того, перемежаемости, фронтальный характер синоптической изменчивости, блокирующие процессы, пробелы в данных, а также продолжительность измерений существенным образом сказываются на "средних" (в том или ином диапазоне) характеристиках, что важно для оценки климатических трендов и т.п.

С целью оценки сложных сочетаний разномасштабных атмосферных процессов рассматривается тестовый ряд изменений температуры воздуха на основе стандартных наблюдений на метеостанции г.Геленджика в период 1952-2012 гг. Модельный ряд состоит из квазигармонических составляющих годовых и суточных колебаний и их обертонов, амплитуды которых получены по соответствующим спектральным максимумам дисперсиям, а фазы подобраны с учётом соответствия наблюдаемому ряду, с добавлением нормального случайного шума, преобразованного по авторегрессионной модели первого порядка, которая по физическому смыслу соответствует динамической системе с экпоненциальной релаксацией температуры под воздействием случайных флуктуаций. Показано, что построенный таким образом "красный" шум является источником самоподобия. Рассмотрены вейвлет-диаграммы, а также распределения по частоте проинтегрированной по времени вэйвлет-плотности, которая сравнивалась с Фурье-спектром, нормированным на дисперсию реализации. Путём сравнения временных рядов с тестовыми заведомо фрактальными рядами типа «случайных блужданий», броуновского движения и кривой фон Коха, с использованием вэйвлет и Фурье разложений, метода Монте-Карло, по-

лучены оценки параметра Херста, размерности фрактальности и достоверности статистических оценок.

Исследованы проявления самоподобия во временных рядах изменений силы ветра на метеостанциях; климатических рядах температуры, давления в центрах действия; атмосферных индексов; спутникового ветра; изменений гидрологических параметров и течений в океане; морского волнения, а также чисел Вольфа.

РОЛЬ АРКТИЧЕСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В ФОРМИРОВАНИИ АНОМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ РЕЖИМОВ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Мохов И.И., Семенов В.А.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,
mokhov@ifaran.ru, vasemenov@mail.ru

Первое десятилетие XXI века, с самой высокой за период инструментальных наблюдений глобальной приповерхностной температурой, сопровождалось рядом аномально холодных зим над континентами Северного полушария. В начале XXI века значительно ускорилось таяние морских льдов в Арктике. В частности, Баренцево море и западная часть Карского моря практически всю зиму свободны ото льда, что не наблюдалось в течение последних 50 лет. Анализ данных наблюдений показывает, что аномальные холода связаны с образованием антициклонической аномалии атмосферной циркуляции в регионе Баренцева моря, которая блокирует западный перенос. Идеализированные численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с заданием монотонного уменьшения концентрации морских льдов в Баренцевом море (от 100% до 0%) показали, что отклик атмосферной циркуляции на увеличение диабатического нагрева нижней атмосферы является нелинейным и характеризуются сменой циклонической аномалии циркуляции над источником тепла антициклонической и далее опять циклоническим режимом. Обнаруженная нелинейная зависимость от концентрации морского льда может объясняться взаимодействием двух основных механизмов, приводящих к противоположным тенденциям. Это конвекция над источником тепла, приводящая к образованию циклонической аномалии циркуляции в регионе Баренцева и Карского морей и изменения горизонтальных градиентов температуры вокруг источника тепла, приводящие (благодаря изменению термического ветра) к антициклонической аномалии циркуляции. Низкие концентрации морского льда в последнее десятилетие соответствуют режиму

формирования антициклонической аномалии и, возможно, объясняют участившиеся повторения холодных зим. Результаты экспериментов с МОЦА с использованием реалистичных аномалий ледового покрова согласуются с предложенным механизмом и воспроизводят формирование антициклона в регионе Баренцева моря как отклик на ускорившееся сокращение ледяного покрова в первом десятилетии XXI века.

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ В РЕАЛЬНОСТИ И В КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Р.И. Нигматулин, Н.В. Вакуленко, Д.М. Сонечкин
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, nigmar@ocean.ru

Рассматривается, как современное потепление климата представлено в рядах инструментальных наблюдений средней глобальной и полушарных приземных температур воздуха и водной поверхности длительностью примерно 150 лет, и в столь же длительных интегрированиях климатических моделей последнего поколения (проект CMIP5). Главное внимание уделяется вариациям потепления в масштабах десятилетий, в особенности нынешней 14-летней приостановке потепления. Именно эти временные масштабы климатологии являются наиболее актуальными для человечества при оценке последствий климатических трендов в ближайшие десятилетия.

Пусть $\langle T\rangle$ средняя глобальная приземная температура воздуха $\left(\langle T\rangle \approx 288\,\mathrm{K}\right)$. Рассмотрим ее малое изменение $\Delta\langle T\rangle$ во времени t, отсчитываемого от момента $t = 0$, в который по определению $\Delta\langle T\rangle = 0$. Это изменение можно представить в линейном приближении в виде, раскрывающем физические причины этого изменения:

$$\Delta\langle T\rangle \approx \sum_i \Delta T_i^\circ \left\{\sin\left(2\pi\frac{t+t_i}{\tau_i}\right) - \sin\left(2\pi\frac{t_i}{\tau_i}\right)\right\} + \sum_j \Delta T_j^\circ \left(\frac{c_j}{c_{j0}} - 1\right). \quad (1)$$

Здесь первая сумма соответсвует периодическим факторам с периодами τ_i, фазами t_i и амплитудами ΔT_i°, а вторая сумма – «парниковым» ($\Delta T_j^\circ > 0$) и «антипарниковым» ($\Delta T_j^\circ < 0$) факторам, связанным с изменениями малых концентраций c_j различных «парниковых» (водяной пар, углекислый газ, метан и т.д.) и «антипарниковых»

(водяные капли в облаках, пылевые частицы от вулканов и т.д.) компонент в атмосфере относительно их значений c_{j0} в момент $t = 0$.

$$\Delta\langle T\rangle \approx \Delta T_{\mathrm{S}}^{\circ}\sin\left(2\pi\frac{t-t_{\mathrm{S}}}{\tau_{\mathrm{S}}}\right)+\sum_{i}\Delta T_{\mathrm{P}i}^{\circ}\sin\left(2\pi\frac{t-t_{\mathrm{P}i}}{\tau_{\mathrm{P}i}}\right)+$$
$$+\Delta T_{\mathrm{Wv}}^{\circ}\left(c_{\mathrm{Wv}}-c_{\mathrm{Wv}}^{\circ}\right)-\Delta T_{\mathrm{Wd}}^{\circ}\left(c_{\mathrm{Wd}}-c_{\mathrm{Wd}}^{\circ}\right)+$$
$$+\Delta T_{\mathrm{CO2}}^{\circ}\left(c_{\mathrm{CO2}}-c_{\mathrm{CO2}}^{\circ}\right)+\Delta T_{\mathrm{CH4}}^{\circ}\left(c_{\mathrm{CH4}}-c_{\mathrm{CH4}}^{\circ}\right)-\Delta T_{\mathrm{D}}^{\circ}\left(c_{\mathrm{D}}-c_{\mathrm{D}}^{\circ}\right)+\ldots$$

Здесь первое слагаемое соответсвует периодическому изменению солнечной активности с периодом факторам $\tau_{\mathrm{S}} \approx 11$ лет. Второе слагаемое, в виде суммы, соответствует периодическим возмущениям с периодами $\tau_{\mathrm{P}i}$, фазами t_i и амплитудами ΔT_i° среднегодового расстояния Земли до Солнца планетами солнечной системы. Вторая сумма – «парниковым» ($\Delta T_j^{\circ} > 0$) и «антипарниковым» ($\Delta T_j^{\circ} < 0$) факторам, связанным с изменениями малых концентраций c_j различных «парниковых» (водяной пар, углекислый газ, метан и т.д.) и «антипарниковых» (водяные капли в облаках, пылевые частицы от вулканов и т.д.) компонент в атмосфере относительно их значений c_{j0} в момент $t = 0$.

Ограничиваясь изменением глобальной температуры в пределах нескольких десятилетий, иметь, прежде всего, принимать во внимание примерно 11-летнее изменение приходящей солнечной радиации E_0 с относительной амплитудой $\Delta E_0/E_0 \sim 10^{-3}$. Отсюда имеем оценку $\Delta T_1^{\circ}/\langle T\rangle \sim \Delta E_0/E_0 \sim 10^{-3}$. Другие планеты немного возмущают орбиту Земли. Наиболее значимые возмущения вносят Венера и Юпитер, чьи периоды вращения вокруг Солнца, равны $\tau_{\mathrm{V}} = 0{,}62$ год и $\tau_{\mathrm{J}} = 11{,}86$ года. Возмущение δR расстояния R от Земли до Солнца из-за Юпитера и Венеры равно $\delta R/R \sim 0{,}5 \times 10^{-4}$ с периодом $\tau_2 \approx 60$ лет, что приводит к оценке $\Delta T_2^{\circ}/\langle T\rangle \sim 2\,\delta R/R \sim 10^{-2}$. Остальные планетные периоды для Земли ($i > 2$) имеют много большие периоды $\tau_i \gg 10^2$ лет, и потому не влияют на изменение температуры в пределах нескольких десятилетий.

В итоге, вариации средней глобальной температуры определяются известным уравнением теплового баланса климатической системы

$$\frac{\mathrm{d}T(t)}{\mathrm{d}t} = \sum_i I_i \sin(2\pi \frac{t+t_i}{\tau_i})[1-\alpha(T(t))] - w(t)\sigma T(t)^4 . \qquad (2)$$

Чувствительность вариаций температуры к циклическим изменениям приходящей солнечной радиации и изменениям концентрации парниковых газов и атмосферных аэрозолей ($w(t)$) можно оценить с помощью функций чувствительности

$$u_{Ii}(t) = \frac{\partial T}{\partial I_i}, \quad u_w(t) = \frac{\partial T(t)}{\partial w} . \qquad (3)$$

Учитывая, что вариации температуры в масштабах десятилетий малы (десятые доли градуса) относительно фонового значения температуры ($285\,\mathrm{K}$), а вариации на этом временном интервале самих внешних воздействий также несущественны, порядок величин этих функций можно оценить как равный 10^{-2}. Для более точной оценки, надо рассматривать эволюционные уравнения

$$\frac{du_{I_i}}{dt} = \left[-I_o \sum_i I_i \sin(2\pi \frac{t+t_i}{\tau_i}) \frac{\partial \alpha(t)}{\partial T(t)} - 4w(t)\sigma T^3 \right] u_{I_i} + I_o \sum_i I_i \cos(2\pi \frac{t+t_i}{\tau_i})[1-\alpha(T)], \qquad (4)$$

$$\frac{du_w}{dt} = \left[-I_o \sum_i I_i \sin(2\pi \frac{t+t_i}{\tau_i}) \frac{\partial \alpha(t)}{\partial T(t)} - 4w(t)\sigma T^3 \right] u_w - \sigma T^4 \qquad (5)$$

Важным элементом этих уравнений является обратная связь, обусловленная изменениями глобального альбедо климатической системы при изменениях температуры. К сожалению, в настоящее время нет определенного мнения даже о том, является ли эта обратная связь отрицательной ($\partial\alpha / \partial T > 0$) или положительной ($\partial\alpha / \partial T < 0$). Отсюда - огромный разброс опубликованных аналитических оценок климатической чувствительности. Отсутствие консенсуса по этому вопросу заставляет ориентироваться на результаты численных экспериментов с климатическими моделями.

В современных климатических моделях принята чувствительность к росту концентрации парниковых газов и аэрозолей, при которой схватывается общий тренд потепления за весь период инструментальных наблюдений, частично воспроизводится замедление потепления с 1940-1960-х годов, а также общая изменчивость температуры относительно тренда. Но эта чувствительность вынуждает предсказывать безостановочное и все ускоряющееся потепление. Реально же потепление приос-

тановилось в конце 20-го века. Поэтому реалистичность этих моделей подвергается сомнению, по крайней мере, в масштабе десятилетий. Кажется, что модели ведут себя по отношению воздействию парниковых газов и аэрозолей на тепловой баланс климатической системы как линейные.

Тщательный анализ вариаций реально наблюденных температур в масштабах десятилетий показывает их более сложную (многофакторную) природу. В частности, видна их частотная модуляция с периодом 90 лет, что составляет половину «тройного» (состоящего из трех лепестков) цикла обращения Солнца вокруг общего центра масс Солнечной системы. Видны также 60-летнее колебание температур с заостренными максимумами (кноидальная волна), являющееся супергармоникой 1:3 цикла обращения Солнца, а также 20-летнее колебание - супергармоника 1:3 одного лепестка этого цикла, т.е. цикла Хейла гелиомагнитной активности. 20-летнее колебание температуры запаздывает по сравнению с циклом Хейла примерно на четверть периода. Это запаздывание в ходе температуры водной поверхности несколько меньше, чем в ходе температуры суши. Отсюда можно думать, что отклик на цикл Хейла сначала появляется в океанической подсистеме глобальной климатической системы.

Можно предположить, что суперпозиция всех этих колебаний, первопричиной которых является гелиомагнитная активность, привела к нынешней (продолжающейся уже 14 лет) приостановке глобального потепления.

ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КЛИМАТА БАССЕЙНА КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Панин Г. Н. [1], *Дианский Н. А.* [2], *Соломонова И.В.* [1], *ВыручалкинаТ.Ю.* [1]
[1] Институт водных проблем РАН, Москва, panin@aqua.laser.ru
[2] Институт вычислительной математики РАН, Москва

Причина колебания уровня Каспийского моря, прогноз его изменений по-прежнему остается одной из не решенных задач. В данной работе предлагается новый подход, базирующийся на результатах анализа воздействия северной Атлантики на формирование климата бассейна Каспийского моря. Для этого привлечены результаты численного моделирования океанической термохалинной циркуляции Атлантики (АТХЦ) и данные параметризации циклических особенностей регионального климата. Был проведен анализ полей изменения осадков и

температуры в бассейне Каспийского моря, исследованы связи этих полей с индексами атмосферной и океанической циркуляции (Североатлантическое колебание (САК), Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО)), приходившиеся на период спада и подъема уровня Каспия. В результате проведенных исследований было показано, что изменения тенденций индекса САК происходит с опережением основных тенденций в уровне Каспия приблизительно на десять лет. Предложен новый сводный индекс переноса влаги с акватории Северной Атлантики.

Эти исследования и моделирование Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ) позволили раскрыть физический механизм, определяющий изменения уровня Каспийского моря, подойти к разработке нового сценария долгопериодных его колебаний, связанных с Атлантикой. Важно отметить, что все основные особенности изменения уровня Каспийского моря проявляются на временных эволюциях АТХЦ и меридионального переноса тепла (МПТ) с небольшими временными сдвигами. Все эти факты представляются важными, так как позволяют рассматривать используемые здесь индексы атмосферной и океанской циркуляции в Северной Атлантике в качестве предикторов для прогнозирования уровенного режима Каспия на ближайшую перспективу, а так же развить модели и методики мониторинга и прогнозирования региональных климатических изменений на примере Каспийского моря.

МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ МАСШТАБОВ И ВАРИАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ОЦЕНОК ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

В.В. Пененко
Институт вычислительной математики и математической геофизики
СО РАН, Новосибирск, penenko@sscc.ru

Представлена методология моделирования для исследования многолетней изменчивости динамики климато-экологической системы и оценивания экологических рисков от воздействий природного и техногенного происхождения. Для разделения масштабов используются оптимизационные методы ортогональной декомпозиции, факторного анализа и сингулярного разложения матриц в фазовых пространствах. Значительный вклад в развитие концептуальных основ этого подхода внесли исследования А.М.Обухова, выполненные им в 1947-1960 гг. Главные факторы представляют собой совокупность многомерных ортогональных базисных подпространств, ранжированных в соответствии с заданным критерием их информативности.

В нашем подходе при организации методов разделения масштабов существенно используются вариационные принципы, объединяющие описания всей совокупности моделей изучаемых разномасштабных процессов и всех доступных данных наблюдений. Они позволяют строить методы прямого и обратного моделирования и, что особенно важно, методы теории чувствительности моделей и функционалов к вариациям входных данных, параметров моделей и источников, а также методы оценок влияния неопределенностей.

В докладе рассматриваются типичные задачи: выявление центров действия в климатической системе, формирование сценариев для решения природоохранных задач, оценка рисков при организации природоохранных стратегий и др.

Работа поддержана Программами фундаментальных исследований №4 Президиума РАН и №3 ОМН РАН; проектом РФФИ №11-01-00187-а; интеграционными проектами №№ 8 и 35 СО РАН.

АТМОСФЕРНЫЕ ПРИЛИВЫ, ТАЙФУНЫ И МУССОНЫ

С.П.Перов

Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, sperov35@mail.ru

В докладе (Perov S.P. Tropical Cyclon (Typhoon): New Approach to its Description. Int. Conf. “Fluxes and Structures in Fluids”, Abstracts, Moscow, 2001. - pp 163-164) тайфун рассмотрен с учетом ракетных данных на с. Тумба (Индия) (Appu K.S. Observational Evidence for Temperature Perturbations in the Equatorial Stratosphere and Mesosphere Associated with Tropical Cyclones, AD-5, IMAP Scientific Results (Proc. 2nd Workshop, SCIENTIFIC REPORT, ISRO-IMAP-SR-32-88, ISRO, Bangalore 569 054, 1988. – p. 37-40) как резонансная система. По данным в (Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 2.1 (1983-2000)/И.В.Покровская, Е.А.Шарков. – М.: Полиграф сервис, 2001. – 548 с.) показано, что депрессии и тропические циклоны формируется при гравитационных (возможно и термических) приливных резонансных явлениях в определенные рассчитываемые даты.

Предлагаемые методы подтверждаются результатами работы с архивами и информацией в Интернете. Так например, анализ связи рассчитываемой скорости вращения Земли (СВЗ) с депрессиями и циклонами дал следующее: для Индийского океана в эти годы из 114 депрессий 76 возникли в интервале 2 дней в обе стороны от дня экстремума СВЗ. Даты - в (Покровская, Шарков, 2001).

Предлагается механизм формирования тайфуна и аномалий муссонных осадков (экстремумы СВЗ), а также технология прогнозирования (с гораздо большей, чем указано выше, прогностической вероятностью) их эволюции.

РОЛЬ ЮЖНО-ТИХООКЕНСКОЙ ЗОНЫ КОНВЕРГЕНЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ АНОМАЛИЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ПЕРИОД СОБЫТИЙ ЭЛЬ-НИНЬО – ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ

Платонов В.С.
Кафедра метеорологии и климатологии
Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва,
vplatonov86@gmail.com

Южно-Тихоокеанская зона конвергенции (ЮТЗК) – важнейший элемент крупномасштабной атмосферной циркуляции в тропиках Тихого океана. ЮТЗК – это устойчивая и протяжённая зона конвергенции в нижней тропосфере, простирающаяся от приблизительно 140^0 в. д. в районе экватора до 120^0 з. д. на 30^0 ю. ш. (J. M. Lough et al., 2011). Она представляет собой область сходимости тихоокеанского пассата и экваториальной зоны западных ветров. Известно, что ЮТЗК характеризуется одним из наиболее значительных и постоянных поясов глубокой конвекции в тропиках и связанных с ним зон интенсивных осадков. ЮТЗК развита в течение всего года, однако наибольшую активность она приобретает в период максимального развития австралийского муссона (Vincent, 1994).

Положение ЮТЗК подвержено большой изменчивости как на масштабах десятилетий, так и в течение одного сезона. Основным фактором, определяющим смещения, распространение и интенсивность ЮТЗК, является **Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК)** – крупнейшая осцилляция, определяющая крупномасштабные аномалии погоды и климата по всему земному шару, главные из которых наблюдаются в тропиках Тихоокеанского региона. В данной работе основное внимание уделено роли характеристик ЮТЗК и сопряжённых с ней элементов атмосферной циркуляции в развитии аномалий атмосферной циркуляции в период кульминации событий ЭНЮК (тёплой и холодной фаз), т. е. на синоптическом масштабе времени.

Для решения поставленной задачи был использован обширный комплекс современных метеорологических данных во всей толще атмосферы: ежедневные данные ре-анализа NCEP/NCAR по горизонтальным

компонентам скорости ветра и аналогу вертикальной скорости на изобарических поверхностях 850, 700, 500 и 200 гПа, а также осадкам и OLR ($2{,}5*2{,}5^0$). Кроме того, использовались данные ре-анализа по ТПО Kaplan ($5*5^0$) и снимки облачности с геостационарных спутников MTSAT, GMS-2, GOES-1 и GOES-9, рассчитывались вертикальная составляющая относительного вихря скорости и индекс циркуляции Петросянца – Гущиной. В ходе первичного анализа были отобраны несколько наиболее ярких случаев, имевших место в период кульминации тёплой и холодной фаз явления ЭНЮК, которые в дальнейшем изучались более детально и представлены в работе. Это 22 января и 22 февраля 1983 г., 1 февраля 1998 г. (Эль-Ниньо), 7 – 11 января и 30 января – 3 февраля 2011 г. (Ла-Нинья).

Комплексный анализ условий атмосферной циркуляции **в период тёплой фазы ЭНЮК (Эль-Ниньо)** позволил выделить следующие основные особенности, характерные для обоих рассмотренных случаев. Главной из них, несомненно, является чрезвычайное развитие тропического циклогенеза в центральном Тихом океане и распространение его далеко на восток за пределы климатического расположения вплоть до 140 – 120^0 з. д. Эти тропические циклоны формируют небывалую по протяжённости и местоположению экваториальную зону западных ветров, замещающую типичный для этих районов пассатный перенос, который в этих ситуациях ослаблен. Вслед за этим смещением интенсифицируется и смещается на несколько тысяч км к востоку и Южно-Тихоокеанская зона конвергенции, что проявляется в экстремальных значениях осадков в центральном тихоокеанском регионе. Ещё одним общим элементом циркуляции является практически полное отсутствие летнего муссона над Австралией, сопровождающееся катастрофическими засухами и пожарами, возникающими из-за формирующегося в этом районе антициклона. Таким образом, экстремальное развитие тропического циклогенеза и связанное с ним перемещение ЮТЗК вносят решающий вклад в формирование аномалий атмосферной циркуляции в период кульминации событий Эль-Ниньо.

Не менее катастрофические последствия были связаны с развитием самого мощного за последние десятилетия **Ла-Нинья 2010/11 гг.** Комплексный анализ всей синоптической информации в январе-феврале 2011 г. показал, что в циркуляции летнего муссона Северной Австралии наблюдалось два периода небывалой активности тропического циклогенеза, которые сопровождались обильными тропическими дождями и ураганными (до 50 – 60 м/с) скоростями ветра. При этом периоды циклонической активности резко контрастировали по направлению перемещения тропических циклонов и по очагам происхождения влагоне-

сущих воздушных масс. **Первый период,** продолжавшийся со 2 по 13 января 2011 г., характеризовался необыкновенно активным тропическим циклогенезом на индо-океанской ветви ВЗК. Зафиксирована ситуация одновременного существования 6 тропических вихрей, причём 3 из них достигали и средней тропосферы, что говорит об их чрезвычайной интенсивности. Такая активная циклоническая ситуация бывает крайне редко и её следствием является формирование в нижней тропосфере над Индийским океаном протяжённой и интенсивной ЭЗЗВ. Это так называемая ситуация «западных бурь». Скорости экваториальных западных ветров в этой зоне превышали 15 – 20 м/с и были сопоставимы со скоростями в западном переносе умеренных широт Южного полушария.

Вторая волна интенсивных муссонных дождей на севере Австралии была уже связана с тропическим циклогенезом на южно-тихоокеанской ветви ВЗК. Этот период продолжался с 28 января по 5 февраля. Здесь уже наиболее яркими были два тропических урагана «Anthony» («Энтони») 29 – 31 января и «Yasi» («Язи») 1 – 3 февраля – самый мощный за всю современную историю Австралии. В этот период основные влагонесущие потоки были уже не западные с Индийского океана, а восточные и северо-восточные из экваториальных широт Тихого океана. Из карт циркуляции видно, что вкупе с антициклоном на юго-востоке Австралии «Язи» вызвал ураганные северо-восточные ветры, порывы которых достигали 50 – 60 м/с, а ливневые дожди, вызванные этим суперциклоном, затопили три четверти штата Квинсленд. Циклоническая циркуляция «Язи» ярко прослеживалась также на изобарических поверхностях 700 и 500 гПа на протяжении всего периода. Мощность вертикального развития ураганов «Язи» и «Энтони» подтверждают карты вертикальных скоростей и завихренности, а также распределения осадков.

Таким образом, показано, что именно резкая интенсификация развития тропических циклонов, их распространение и локализация определяет аномалии атмосферной циркуляции в тропической зоне, проявляющиеся в первую очередь в беспрецедентной миграции экваториальной зоны западных ветров на несколько тысяч километров в широтном направлении, и, соответственно, смещении и интенсификации ЮТЗК. Резкая активизация тропического циклогенеза определяет развитие крупномасштабных аномалий в тропической зоне, проявляющихся в миграции и интенсификации основных систем циркуляции в тропиках: пассатов, муссонов и ВЗК.

Южно-тихоокеанская зона конвергенции, являясь важнейшим звеном циркуляции атмосферы в тропиках Тихого океана, в период кульминации событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья испытывает беспрецедентные

миграции на восток и на запад соответственно и влечёт за собой катастрофические наводнения и засухи в различных регионах тропиков Тихого океана, удалённых друг от друга на несколько тысяч километров. При этом, важнейшим атрибутом развития ЮТЗК является резкая активизация тропического циклогенеза в системе экваториальных западных ветров.

1. J.M. Lough, G. A. Meehl and M . J. Salinger. *Observed and projected changes in surface climate of the tropical Pacific*. In: Bell JD, Johnson JE and Hobday AJ (eds) (2011) Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change. Secretariat of the Pacific Community, Noumea, New Caledonia, 2011.
2. D.J. Vincent. *The South Pacific Convergence Zone (SPCZ): A Review*. Mon. Wea. Rev., vol. 133, pp. 1949 – 1970, 1994.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Романов Л.Н.
Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Новосибирск, lromanoff@mail.ru

В докладе рассматриваются возможности крупномасштабного моделирования процессов в атмосфере на основе статистических критериев. Временные ряды регулярных атмосферных наблюдений служат основой для восстановления пространственно- временных зависимостей, которые позволяют предсказать развитие процесса на шаг вперед. Для этой цели исходное многомерное распределение ситуаций представляется в виде совокупностей простых распределений, и неизвестная функция восстанавливается для каждого из таких распределений отдельно. При этом аппроксимация функций с использованием критерия минимума среднего риска осуществляется одновременно как по времени, так и по пространству. Это позволяет использовать существующие ряды данных с наибольшей эффективностью.

Сформулированы основные отличия и основные преимущества предложенной модели по сравнению с традиционными методами глобального прогнозирования.

Изложен эксперимент по прогнозу глобального атмосферного давления и температуры на один шаг вперед. Результаты эксперимента подтверждают приведенные в докладе выводы, основанные на теоретических рассмотрениях.

ВЛИЯНИЕ ГОДОВОГО И МЕСЯЧНОГО ОБРАЩЕНИЙ ЗЕМЛИ НА ЦИКЛИЧНОСТЬ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ, ИЗМЕНЕНИЙ ПОГОДЫ И КЛИМАТА

Н.С. Сидоренков
Гидрометцентр России, Москва, sidorenkov@mecom.ru

Годовое и месячное обращения Земли порождают лунно-солнечные приливы, метеорологические сезоны, естественные синоптические периоды (ЕСП) и синхронизуют изменения погоды с взаимными положениями Земли, Луны и Солнца.

При исследовании причин аномально жаркого лета 2010 г. на европейской территории России выяснилось, что продолжительность солнечного сияния, количество облачности и, в конечном итоге, приток солнечной радиации модулируются лунно-солнечными приливами. Интенсивность модуляции зависит от сезона года. Продолжительность земных (лунных) месяцев не кратна солнечному году. «Приливный» год, равный 13 сидерическим или 12 синодическим месяцам длится 355 суток. Перигейное расстояние Луны и Земли изменяется с периодом 206 суток. Поэтому, приток солнечной радиации изменяется не только с периодом солнечного года 365,24 сут., но и с «приливными» периодами 355 сут. и 206 сут. Сложение этих колебаний порождают квази 35 летние и 4-х летние биения метеоэлементов, притока солнечной радиации, компонент радиационного и теплового балансов земной климатической системы, форсинга таких геофизических процессов, как движение полюсов, декадной неравномерности вращения Земли, декадных изменений климата, интенсивности индийского муссона, состояния ледникового щита Антарктиды и др. Приводятся соответствующие графики, на основе которых сделаны эти выводы.

Показано, что квазидвухлетняя цикличность смены направления ветра в экваториальной стратосфере является комбинационным колебанием, возникающим вследствие воздействия на атмосферу трех периодических движений: а) обращения системы Земля-Луна вокруг Солнца, б) прецессии орбиты системы Земля-Луна и в) движения их перигея.

ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ПОРЫВОВ ВЕТРА

Смирнова М.М[1], Рубинштейн К.Г.[1], Курбатов Г.А.[2]
[1]Гидрометцентр России, Москва, marja1702@gmail.com
[2]МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

Для многих прикладных задач важен прогноз не только скорости среднего ветра, но и скорости порывов ветра. При небольшой средней скорости ветра порывы могут достигать значительных величин. Порывы ветра, как экстремальные проявления вариаций скорости ветра, являются результатом перемешивания момента импульса посредством турбулентности в атмосферном пограничном слое. Порывы ветра являются статистической мерой атмосферной турбулентности.
Для расчета скорости порывов ветра существует достаточно большое количество различных полуэмпирических методов. В работе приводятся примеры использования пяти наиболее часто используемых методов расчета порывов ветра, рассчитаны оценки прогноза порывов ветра на основе прогнозов модели WRF-ARW за разные периоды времени. Приведено сравнение этих методов между собой и с данными высокочастотных наблюдений за ветром в Москве (МГУ). В большинстве случаев наиболее близким к наблюдениям оказался простой эмпирический способ использования фактора порывов ветра. При этом использование турбулентной кинетической энергии дает лучшие или сравнимые результаты. Рассмотрена возможность использования таких оценок для диагностики турбулентности из наблюдений за порывами ветра.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Д.М. Сонечкин
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, dsonech@yandex.ru

Существуют два принципиально разных подхода к описанию и предсказанию динамики крупномасштабных атмосферных процессов. Один подход, который уместно называть подходом «грубой силы», опирается на огромные возможности современной вычислительной техники. Он предлагает все больше и больше увеличивать пространственное разрешение в моделях динамики атмосферы, чтобы явно описывать в них мелкомасштабные особенности тепло- влагопереноса, непосредственно влияющие на краткосрочное прогнозирование локальной

погоды, но также не могущие не быть существенными для крупномасштабных и долгосрочных предсказаний погоды и даже климата из-за взаимодействий всех масштабов движения, присущих атмосфере. При этом предполагается, что проблемы, связанные с неустойчивостью этих движений, разрешатся «сами собой», коль скоро детализация позволит описывать процессы тепло- влагопереноса все более точно. В результате, как предполагается, одну и ту же супермодель можно будет использовать и для краткосрочных прогнозов локальной погоды, и для долгосрочных ее прогнозов и даже для предсказаний короткопериодных (на годы и десятки лет вперед) предсказаний изменений климата (концепция «бесшовного» предсказания - seamless prediction).

Другой подход существенно учитывает то, что все атмосферные процессы гидродинамически неустойчивы. В сочетании с неизбежно имеющими место неточностями в данных, описывающих начальное состояние атмосферы, эти неустойчивости ограничивают возможности предсказания всех этих процессов. Вместе с тем, интервал времени, на котором процесс остается еще предсказуемым, различно для процессов разного масштаба. Поэтому рациональным кажется конструировать отдельную модель для каждого масштаба движения по отдельности, параметризуя каким-то образом его взаимодействия с более мелкомасштабными (и более крупномасштабными) движениями. Отсюда вытекает необходимость нахождения больших и малых параметров в уравнениях гидротермодинамики атмосферы, с помощью которых можно было бы подразделить все существующие типы атмосферных движений по масштабам таким образом, чтобы такие параметризации взаимодействий оказались устойчивыми.

Число Кибеля оказалось первым «малым параметром», который удалось использовать для выделения класса крупномасштабных квазигеострофических движений, на которые, в первом приближении, не влияли более мелкомасштабные гравитационные волны, весьма быстро разрушавшие предсказуемость крупномасштабных движений в исходных уравнениях гидротермодинамики атмосферы. Как известно, в последующих приближениях удалось вернуться к уравнениям, включающим явное описание быстрых волн («полным» уравнениям). Однако сама идея подразделения всего спектра атмосферных движений по масштабам осталась плодотворной.

Реализация этой идеи для преодоления недельного предела предсказуемости, присущего всем современным моделям «полных» уравнений, оказалась возможной только после развития во второй половине 20-го века теории нелинейных динамических систем, пионером применения которой к задачам метеорологии в нашей стране был А.М. Обухов. В

его «цепочке триплетов» - обобщенном представлении каскада атмосферных движений разных масштабов, нашелся странный аттрактор (см.: Sonechkin «On bifurcations inducing a strange attractor in the system of A.M. Oboukhov». J. Statist. Phys., 1979, v. 50).

Дальнейшие исследования систем такого рода (Сонечкин Стохастичность в моделях ОЦА, Л.: Гидрометеоиздат, 1984) привели к обнаружению синхронизации фаз планетарных волн при их распространении в системе западно-восточного переноса в тропосфере и, как следствие, к уяснению того факта, что обратную величину характерного периода обращения воздушных частиц вокруг Земли в системе этого переноса (примерно 30 дней) можно использовать как еще один «малый параметр» атмосферной динамики в дополнение к числу Кибеля. Он позволяет отделить описание «медленных» синхронизованных движений планетарных волн от «быстрых» несинхронизованных.

Простейшая модель «медленных» движений была реализована (Sonechkin et al. Monthly Weather Review, 1995, v. 123; Сонечкин ДАН, 2005, т. 400, № 5) на основе спектральной формы баротропного уравнения вихря скорости. Волны в поле H500 северного полушария представляются в этой модели при пятидневном осреднении. Модель интегрируется на 40 дней вперед в оперативном режиме. С помощью аналогов и синоптического опыта удается интерпретировать эти интегрирования в терминах хода погоды в Москве и некоторых других городах Европы на месяц вперед (Сонечкин «Хаос и порядок в динамике погоды и климата». Часть 1. С-Пб.: Гидрометеоиздат, 2005).

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ КЛИМАТА

В. А. Тартаковский, В. А. Крутиков, А. И. Кусков
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск,
trtk@list.ru

Новые знания о климатической системе можно получить, основываясь на физической предпосылке, по которой внешнее вынуждающее воздействие должно проявляться в некотором сходстве элементарных процессов, вызванных этим воздействием. Сходство определяется совпадением существенных признаков представляющих функций, которые надо установить. При этом выявляемые структуры определяются заданным набором расстояний, и в последовательном заполнении исчерпывают многомерное пространство отображений.

Анализ данных наблюдений температуры с 249-ти метеостанций Европы, всей России и прилегающих стран дал следующие результаты.

• Обнаружены структурные особенности синхронности температурных полей, которые предположительно объясняются ходом водонаполнения бассейнов рек.

• Пространственно-временная структура времен года может определяться составляющими рядов температуры с совпадающими и несовпадающими существенными признаками, выделенными при сопоставлении рядов температуры и чисел Вольфа.

• Выявлены особенности миграции очагов тепла и холода, при этом Северо-Атлантическое течение отепляет Северную Европу в холодный период года, а в теплый - охлаждает её.

• Построена траектория миграции полюса холода от зимы к лету на АТР из района Верхоянска-Оймякона к Северному полюсу.

• При локальном анализе установлено сглаживающее влияние Большого Васюганского болота на температуру (в пределах 1°C), что ранее не выявлялось на масштабе АТР.

В докладе приводятся теоретические основы излагаемых подходов и карты, иллюстрирующие результаты.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СРЕДНЕСЕЗОННОЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ МОДЕЛЬЮ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ И СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛЬЮ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Толстых М.А.[1,2], Дианский Н.А.[1], Гусев А.В.[1], Киктев Д.Б.[2], Зарипов Р.Б.[2]

[1]ФГБУН Институт вычислительной математики РАН, Москва

[2]Гидрометцентр России, Москва, mtolstykh@mail.ru

Разработана новая совместная модель атмосферы и океана. Используется глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ, разработанная в ИВМ РАН и Гидрометцентре России. Модель ПЛАВ состоит из блока решения уравнений динамики атмосферы собственной разработки (Толстых, 2001; 2010), и параметризаций процессов подсеточного масштаба, разработанных консорциумом ALADIN/LACE. Используется версия модели с разрешением 1.1x1.4 градуса по широте и долготе и 28 вертикальных уровней. В качестве модели океана используется сигма-модель Института вычислительной математики РАН (Дианский и др., 2002), которая также используется в модели климата ИВМ РАН INMCM, участвующей в проекте CMIP. Модель океана включает мо-

дель морского льда (описание его термодинамики и динамики). Разрешение используемой модели океана 0.5x1 градуса по широте и долготе соответственно, 40 уровней. После анализа экспериментов по оценке глобально усредненного потока тепла к океану из модели атмосферы, модели атмосферы и океана соединены без коррекции потоков.

Были выполнены расчеты среднесезонной циркуляции за период 1989-2010 для всех сезонов по совместной модели. Результаты воспроизведения атмосферной циркуляции сравнивались с результатами экспериментов по воспроизведению среднесезонной уиркуляции моделью атмосферы с простой моделью эволюции аномалии температуры поверхности океана (ТПО). Показано, что совместная модель, в частности, несколько улучшает воспроизведение среднесезонной приземной температуры в тропиках по сравнению с моделью атмосферы с простой моделью эволюции аномалии ТПО.

Представлены планы дальнейшего развития этой совместной модели, в частности применения модели океана с высоким горизонтальным разрешением.

СОЗДАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Фролов А.В.[1], *Цветков В.И.*[2]
[1]Росгидромет, Москва,
[2]Гидрометцентр России, Москва, tsvetkov@mecom.ru

Работы А.М.Обухова дали теоретическое обоснование гидродинамического прогноза погоды, основанного на решении уравнений Навье-Стокса со сложной правой частью, в которую включены неадиабатичесоке эффекты подсеточного масштаба. Точность и практическая полезность гидродинамического прогноза погоды зависит от ошибок начальных данных, погрешностей прогностической модели и природной предсказуемости атмосферных процессов. Современные исследования фокусируются на создании прогностических моделей максимально высокого пространственного разрешения. Увеличение разрешения повышает точность прогностической модели, в том числе благодаря явному воспроизведению некоторых процессов, которые ранее относились к подсеточному масштабу. Особое значение увеличение разрешения имеет в тропиках, где в отличие от средних широт априори нет причин предполагать доминирование крупномасштабных погодных систем. Восточ-

ные волны, тропические циклоны занимают только малую часть тропической зоны, в то время как облачные кластеры с характерным горизонтальным масштабом порядка10-50 км наблюдаются в тропиках везде. Модели прогноза погоды станут полными, если наряду с бароклинной неустойчивостью в средних широтах будут явно воспроизводить вертикальную конвекцию в тропиках.

Предлагается метод приближения на сфере любых сеточных функций двойными рядами Фурье по ультрасферическим многочленам, частными случаями которых являются многочлены Лежандра, многочлены Чебышёва первого и второго рода. Полученные по этому методу ряды равномерно сходятся во всех точках сферы, включая полюса. Кроме того, эти ряды имеют дополнительные слагаемые, которые аппроксимируют нечётные относительно полюсов составляющие искомых функции. В малой окрестности полюсов (‘полярных шапках’) ряды упрощаются за счёт близости к нулю этих слагаемых. С приближением к экватору вклад несимметричных относительно полюсов компонент возрастает и становится соизмеримым с вкладом симметричных компонент.

Разложения по многочленам Чебышёва первого и второго рода (тригонометрические ряды) позволяют применять быстрое преобразование Фурье по обеим координатам, что в log N раз повышает вычислительную эффективность алгоритма, где N – число точек по широте. Рассматриваются особенности построения глобальной спектрально-сеточной модели высокого пространственного разрешения на основе рядов по ультрасферическим многочленам.

Показана целесообразность использования корней ортогональных полиномов Чебышёва–Лагерра, заданных на полубесконечной прямой, в качестве узлов сетки по вертикальной сигма-координате. Этот алгоритм обеспечивает наивысшую алгебраическую точность квадратурных формул и приводит к более устойчивой (в смысле обусловленности) матрице вертикальной структуры дискретного аналога линеаризированного динамического оператора модели. Изменяя параметр многочлена Чебышёва-Лагерра можно варьировать положение нижнего основного уровняв приземном слое атмосферы.

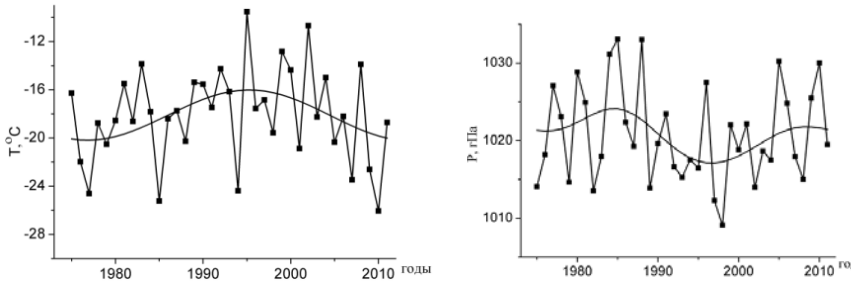
На основании численных экспериментов даются оценки точности спектрально-сеточных преобразований для различных метеорологических полей.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Харюткина Е.В., Логинов С.В., Ипполитов И.И.
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск,
ceo@imces.ru

В рамках данной работы проводилось исследование темпов регионального потепления. Для территории Западной Сибири были получены средние поля температуры воздуха и давления, а также поля их линейных трендов для двух периодов исследования: с 1975 по 2005 гг. и с 1981 по 2011 гг. По результатам анализа данных инструментальных наблюдений выявлено, что, в целом, наблюдается уменьшение скорости роста температуры, а в зимние месяцы начала XXI века тренды среднемесячных приземных температур изменились от положительных к отрицательным величинам при положительном изменении тренда среднемесячного давления.

Были проанализированы особенности межгодовой изменчивости температуры и давления воздуха и их тенденции за интервал с 1975 по 2011 гг. (рис. 1).



а) б)

Рис. 1. Межгодовой ход температуры (а) и давления (б) в феврале для территории Западной Сибири (сплошная линия – фильтр низких частот) за период 1975-2011 гг.

Из рис. 1 следует уменьшение температуры в феврале, начиная с 1995 г. Рост давления начинается с 1998 г. Колебания в рядах давления в зимний период находятся, в целом, в противофазе с колебаниями температуры воздуха.

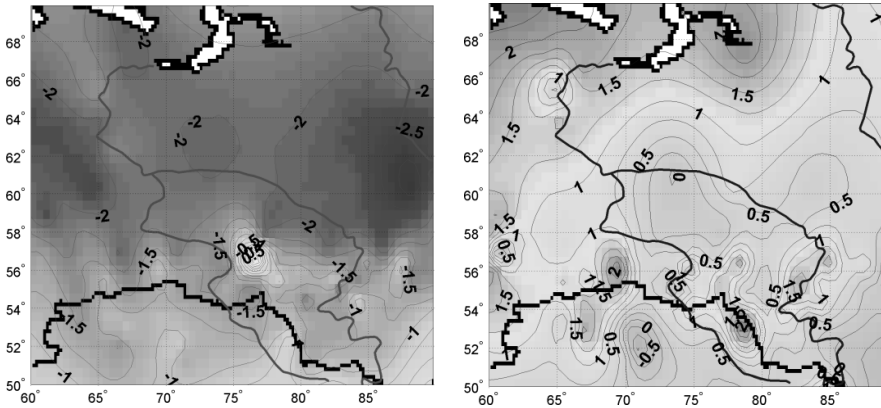
В таблице приведены для зимних месяцев значения коэффициентов линейных трендов температуры за промежутки времени 1975-2005 гг. и 1981-2011 гг. и коэффициенты линейных трендов давления за эти же интервалы, а так же разности коэффициентов за эти два временных промежутка.

Таблица

Тенденции изменения температуры зимних месяцев для территории Западной Сибири при переходе от интервала 1975-2005 гг. к интервалу 1981-2011 гг.

Месяцы	Тренд температуры, ºС/10лет (1975-2005гг.)	Тренд температуры, ºС/10лет (1981-2011гг.)	Тренд давления, гПа/10лет (1975-2005гг.)	Тренд давления, гПа/10лет (1981-2011гг.)	δTtr, ºС/ 10лет	δPtr, гПа/ 10лет
Декабрь	0,04	-0,21	**0,86**	**1,29**	-0,25	0,43
Январь	-0,11	**-1,24**	-0,25	**2,60**	**-1,13**	**2,85**
Февраль	**0,68**	**-1,26**	**-0,65**	0,17	**-1,94**	**0,82**

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые оценки (α = 0,05).



а) б)

Рис. 2. Пространственное распределение разности трендов в феврале:
а) - для температуры, °С/10лет, б) - для давления, гПа/10лет.

Основываясь на рассчитанных оценках разности трендов температуры и давления ($\delta Tr = Tr_{1981\text{-}2011} - Tr_{1975\text{-}2005}$) между двумя исследуемыми периодами, были построены карты их пространственного распределения за каждый календарный месяц. Пример такого распределения приведен на рис. 2.

Из рисунка видно, что уменьшение скорости потепления происходит неравномерно по территории Западной Сибири и носит, в основном, очаговый характер.

Это явление, как показывает анализ завихренности в областях повышенного тренда давления, связано с процессами блокирования переноса атмосферы на западной и южной границах Западной Сибири. Наличие областей роста давления воздуха на западе территории (над Уралом) создает препятствие для западного переноса и способствует затоку арктического воздуха из северных широт, что приводит к понижению температуры воздуха в Западной Сибири (рисунок 2а). Аналогичные пространственные распределения темпов изменения температуры и давления наблюдаются для декабря и января.

Приведенный пример показывает случай локального похолодания в зимние месяцы в достаточно большом регионе Сибири. Применительно к среднегодовым величинам сохраняется положительный тренд температуры, но во втором временном интервале он существенно уменьшается.

КЛИМАТОЛОГИЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗИМНЕЙ ОБЛАЧНОСТИ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Чернокульский А.В.[1], *Эзау И.Н.*[2], *Мохов И.И.*[1]

[1] Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, A.Chernokulsky@ifaran.ru

[2] Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Берген, Норвегия

Проанализирована пространственно-временная структура поля общей облачности в зимний период в полярных широтах Северного полушария. Выбор зимнего периода обусловлен максимальным радиационным эффектом, связанным с облачностью, в отдельных регионах Арктики облачно-радиационный форсинг (разность радиационных потоков между облачной и безоблачной атмосферой) достигает 100 Вт/м^2, при этом облачность оказывает существенное влияние на температурный режим.

Проведен сравнительный анализ 16 различных климатологий зимней облачности в Арктики, основанных на наземных и спутниковых наблюдениях и на данных реанализа. Показано, что в зимний период различные базы данных существенно различаются. Облака зимой покрывают от 55 до 72% Арктики по разным данным наблюдений (и от 47 до 93% по данным реанализа). Коэффициент пространственной корреляции

различных данных наблюдений выше над океаном (0,7-0,95) и ниже над сушей (0,3-0,75). Для некоторых данных реанализа получена отрицательная пространственная корреляция с данными наблюдений. В целом, данные реанализа воспроизводят зимнюю облачность в Арктике неудовлетворительно и не могут быть использованы для анализа межгодовой изменчивости.

Для анализа межгодовой изменчивости зимней облачности и её влияния на температурный режим были отобраны данные визуальных наблюдений за облачностью с российских и норвежских метеорологических станций с учетом степени освещенности Луной. Анализ проведен для разных регионов (безлёдная акватория Норвежского и Гренландского морей, покрытая льдом акватория Карского моря, «транзитная» зона Баренцева моря) и разных периодов (потепление первой трети и середины XX в., похолодание второй трети XX в., современное потепление). Выявлены различия связи облачности и приповерхностной температуры. Отмечено, что современное потепление характеризуется большей повторяемостью теплых и пасмурных дней, чем похолодание второй трети XX в., при этом во время раннего потепления XX в. пасмурных дней (как холодных, так и теплых) зимой было больше, чем для современного климата. Показано, что хотя связь облачности с температурой и варьируется как в пространстве, так и во времени, в целом температурный режим над открытой водой и в теплые периоды более чувствителен к изменению количества ясных дней, а температурный режим надо льдом и в холодные периоды – к изменению количества пасмурных дней.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАМЕРЗАЮЩИХ ОСАДКОВ В ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ГОЛОЛЕД В ДЕКАБРЕ 2010 г.

Н. П. Шакина, И. А. Хоменко, А. Р. Иванова, Е. Н. Скриптунова
Гидрометцентр России, Москва, chakina@mecom.ru

Замерзающие осадки, образующие гололед, - по-видимому, наиболее опасный и разрушительный тип осадков в умеренных и высоких широтах и в горных районах, - изучаются прежде всего в связи с проблемами обледенения самолетов и отложений льда на линиях связи и на дорогах. Эти явления обусловлены выпадением переохлажденных (т.е. имеющих температуру ниже 0°C) капель дождя или мороси на холодную поверхность. В разное время были предложены два механизма образования переохлажденных осадков. Один из них (классический) предполагает

наличие слоя воздуха с положительной температурой над приземным холодным слоем, другой допускает образование переохлажденных осадков в отсутствие теплого слоя.

В докладе представлено распределение повторяемости гололеда по европейской России и сравнительный вклад обоих механизмов на отдельных станциях по данным радиозондирования и наблюдений на аэродромах. На примере эпизода катастрофического гололеда 25-26 декабря 2010 г. обсуждается роль трехмерности процесса формирования переохлажденных осадков в потоке теплого воздуха («теплой несущей полосы»), поднимающегося над теплым фронтом циклона.

ГЛОБАЛЬНЫЙ ТРОПИЧЕСКИЙ ЦИКЛОГЕНЕЗ КАК ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗЕМЛИ

Шарков Е.А.
Институт космических исследований РАН, Москва, e.sharkov@mail.ru

Временной темп генерации и эволюция атмосферных катастроф - тропических циклонов (ТЦ), а также их роль в климатической системе Земли представляет серьезную и пока нерешенную задачу. Проблема заключается в поиске адекватного описания степени неравновесности глобального циклогенеза как стохастического процесса генерации атмосферных катастроф в многомасштабной системе океан-атмосфера в режиме интенсивного термо-массообмена [Шарков, 2010]. В работе предлагается новый подход, связанный с формированием временного стохастического потока событий тропического циклогенеза. При этом каждое тропическое возмущение представляется как импульс единичной амплитуды со случайной длительностью, соответствующей времени функционирования ТЦ, и со случайными моментами генезиса (генерации индивидуального ТЦ). Поскольку становится ясным, что глобальный тропический циклогенез (ГТЦ) является проявлением сложного нелинейного поведения единой термогидродинамической системы океан - атмосфера, обладающей собственными динамическими свойствами, характерными временными масштабами и (возможно) резонансными частотами [Afonin and Sharkov, 2003], полный изучение этого процесса следует проводить в рамках вейвлет-анализа. ГТЦ представляет собой пример хаотизированного процесса с довольно сложной иерархической структурой, в котором результирующая картина формируется вследствие целой серии термогидродинамических взаимодействий разной интенсивности, происходящих в широком диапазоне временных

и пространственных масштабов [Sharkov, 2012]. Для выявления разномасштабных внутренних связей ГТЦ был использован вейвлет-анализ, который продемонстрировал, что действительно, ГТЦ как временной объект обладает иерархической временной структурой и набором выделенных масштабов: можно указать на масштабы 1-6 суток, где ГТЦ может быть представим как чисто пуассоновский процесс (с независимыми событиями); на масштабах порядка 1 месяца механизмы функционирования ГТЦ включают нелинейные взаимодействия (по-видимому, через атмосферные глобальные циркуляции), которые формируют буфиркационные "вилки" на вейвлет-диаграммах. На масштабах порядка шести месяцев система ГТЦ резко линеаризуется. Таким образом, ГТЦ может быть представлен в виде трехкомпонентной стохастической структуры. При этом вклад каждой из компонент в климатику системы океан-атмосфера по своим физическим свойствам может быть совершенно различен. Для количественного описания стохастического процесса генерации и эволюции в работе также использованы и другие параметры стохастического потока событий – дифференциальная («истинной») и интегральная интенсивность, коэффициент перемежаемости потоков и функция накопленных событий F(t) . Функция накопления сигнала для глобального циклогенеза, рассматриваемого для всех активных акваторий Мирового океана, и циклогенеза для активных акваторий Северного (СП) и Южного (ЮП) полушарий была рассмотрена для трех временных масштабов - за 25-летний период (1983-2007гг.); за 5-летний период (1983-1987гг) и – за годовой период (1983г). Анализ данных показал, что поведение F(t) на различных временных масштабах коренным образом изменяется. Так за 25-летний временной цикл глобальный циклогенез представляет собой практически строго однородный (пуассоновский) процесс с универсальной постоянной интенсивности процесса как в глобальном масштабе (dF/dt = 1,64 1/сутки), так и циклогенезов, развивающихся в акваториях полушарий. Так для циклогенеза в Северном полушарии интенсивность составит 1,14 1/сутки , а циклогенеза в Южном полушарии - 0, 5 1/сутки . Небольшая волнообразная «рябь» на основном ходе функции накопления связана с полугодовыми вариациями циклогенеза в Северном и Южном полушариях. Отметим, что никакого влияния на ход глобального циклогенеза особенности телекоммуникационных связей в климатической системе Земли не оказывают, и универсальная постоянная циклогенеза остается постоянной величиной. Аналогичное построение, выполненное ранее автором за 10-летний период [Sharkov, 2000], показало, что и на этом временной интервале интегральная интенсивность глобального циклогенеза остается строго постоянной величиной, равной 1,64 1/сутки. На

основе результатов корреляционного анализа временного потока интенсивности глобального тропического циклогенеза, сформированного по данным космических наблюдений, в работе показана возможность описания процессов глобального циклогенеза в системе океан-атмосфера как релаксационную генерацию кинетико-диффузионного (ланжевеновского) типа в слабонеравновесной среде. Выявлены этапы кинетической и диффузионной релаксации с переходом на режим фликкер-шума. Механизмы реакции и диффузии могут быть интерпретированы в этом случае следующим образом: процессы рождения и гибели элементов системы соответствуют возникновению (рождению) ТЦ и его исчезновения (диссипации, гибели), а диффузия – как случайные "блуждания" длительности функционирования единичных ТЦ и как случайный временной поток моментов возникновения ТЦ. Представленная модель может быть использована в задачах по исследованию вариаций глобального климата планеты

На основе результатов работы делается заключение о том, что глобальная система океан-атмосфера (тропическая зона) находится в условиях весьма слабой неравновесности и, таким образом, возможность принципиальной перестройки мезомасштабного конвективного режима тропической атмосферы в глобальный синхронный катастрофический режим генерации "супертайфуна" крайне низка. В пользу указанного заключения, несомненно, говорит и то обстоятельство, что на масштабах десяток и сотен лет система океан-атмосфера может быть описана как слабонелинейная релаксирующая среда, описывающаяся уравнениями слабонелинейного осциллятора. Явная зависимость от эпизодов ENSO выявлена только для региональных циклогенезов (Северная Атлантика) в режиме годового накопления [Sharkov,2000], и она полностью отсутствует для глобальных режимов циклогенеза при рассмотрении интегрального режима генерации за 25-летний период.

Литература

[Шарков, 2010] Шарков Е.А. *Дистанционные исследования атмосферных катастроф* // Исследование Земли из космоса. 2010. №1. С. 52-68.

[Afonin and Sharkov, 2003] Afonin V.V. and Sharkov E. A. *Helioactivity and properties of global tropical cyclogenesis*. // Auroral Phenomenan and Solar-terrestrial Relations. Proceedings of the Conference in Memory of Yuri Galperin, 3-7 February 2003, Moscow. P. 421-429.

[Sharkov, 2000] Sharkov E. A. Global *Tropical Cyclogenesis.* Springer/PRAXIS. Berlin, Heidelberg, London, New York etc. 2000. 361 p.

[Sharkov, 2012] Sharkov E.A. *Global Tropical Cyclogenesis*. The 2nd Edition. Springer/PRAXIS. Berlin, Heidelberg, London, New York etc. 2012. 650 p.

К ОЦЕНКАМ ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ДИНАМИКУ АТМОСФЕРЫ

М.И. Ярошевич, Л.Х. Ингель
НПО «Тайфун», Обнинск, lev.ingel@gmail.com

Проведен анализ натурных данных, относящихся к вариациям интенсивности и перемещению тропических циклонов в связи с возможным влиянием на это аномалий (неоднородностей) силы тяжести. Результаты свидетельствуют о возможности такого влияния.

Построены простейшие теоретические модели динамики возмущений, вносимых в атмосферные течения неоднородностями поля силы тяжести.

Некоторые из результатов к настоящему времени опубликованы или приняты в печать:

1. Ярошевич М.И. *О некоторых признаках влияния аномалии силы тяжести на тропические циклоны северо-западной части Тихого океана* // Докл. РАН. 2011. Т. 437. № 4. С. 548-542.
2. Ярошевич М.И. *Пространственное распределение тропических циклонов и аномалий силы тяжести* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. №2 (принято в печать).

III. Физика и состав атмосферы

ВЛИЯНИЕ БИОГЕННЫХ ЭМИССИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ И ОБЛАЧНОСТИ НАД МОРЕМ

А.Е.Алоян
Институт вычислительной математики РАН, Москва, aloyan@inm.ras.ru

Построена совместная модель влажной конвекции и формирования сульфатных аэрозолей и облачности в тропосфере над морем с учетом биогенных эмиссий. В большинстве моделей влажной конвекции облака над морем образуются в основном на высотах 500–1200 м, а в реальности они могут формироваться и в средней и верхней тропосфере. Обычно над морской поверхностью атмосферные ядра конденсации начиная с высоты 500 м экспоненциально убывают с высотой и тем самым затрудняют процесс образования облаков. Поэтому нужно искать новые механизмы, ответственные за образование ядер конденсации в тропосфере над морем. Одним из таких механизмов является эмиссия диметилсульфида от морской поверхности, который вследствие фотохимической трансформации над морем становится источником образования паров серной кислоты, приводящих к развитию процесса гомогенной бинарной нуклеации. В результате нуклеации в атмосфере формируются первичные мельчайшие аэрозольные частицы, которые со временем растут из-за конденсации и коагуляции. Эти частицы выступают в роли ядер конденсации и способствуют процессу образования облака. Численные эксперименты проводились в следующей последовательности: сначала решается задача глобального переноса газовых примесей и аэрозолей в атмосфере с учетом эмиссий веществ антропогенного и биогенного происхождения. В модели учитываются основные физические и химические механизмы, ответственные за формирование сульфатных частиц в тропосфере и нижней стратосфере. Далее, в тех областях тропосферы над морем, где формируются сульфатные аэрозоли (т.е. ядра конденсации) с радиусами от 3 нм до 1.5 мкм, решается задача влажной конвекции и формирования облачности с учетом детальной микрофизики, с использованием неравновесной функции распределения облачных частиц и ядер конденсации по размерам. По разработанным моделям проводились численные эксперименты с учетом и без учета сульфатных частиц. Анализ

численных экспериментов показывает, что сульфатные частицы оказывают существенное влияние на процессы формирования облачности в средней и верхней тропосфере над морем. Следует отметить, что без учета сульфатных частиц облако в средней тропосфере над морем практически не формируется (кроме случаев, связанных с конвективной облачностью).

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2 В ТОЧКАХ НАБЛЮДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ GELCA

А.В. Ганьшин
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, alex@ganshin.ru

В данной работе представлена методика моделирования концентрации углекислого газа в точках наблюдения с использованием объединенной Эйлеровой/Лагранжевой модели и приземных эмиссий CO_2 антропогенного, биосферного и океанического происхождения. Проведено сравнение модельных концентраций с наблюдениями и показано, что модель может успешно применяться для анализа и восстановления наблюдений на станциях постоянного мониторинга, вдоль маршрутов самолетов и вдоль орбиты спутников.

А.М. ОБУХОВ И РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА КИСЛОВОДСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ ИФА И В РЕГИОНЕ КАВМИНВОД

Г.И. Горчаков, А.С. Емиленко, А.А. Исаков, М.А. Свириденков
Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва, gengor@ifaran.ru

А.М. Обухов много внимания уделял развитию экспериментальных исследований качества атмосферного воздуха на территории КавМинВод. При поддержке А.М. Обухова в этом регионе проводились регулярные исследования аэрозольного загрязнения атмосферы.

В 1983–1991 гг. в г. Кисловодске выполнялись круглосуточные измерения массовой концентрации субмикронного аэрозоля. Периодически измерялись концентрация сажевого аэрозоля и распределение частиц аэрозоля по размерам. Несколько позднее были начаты регулярные измерения характеристик атмосферного аэрозоля на КВНС. В течение

нескольких лет выполнялись маршрутные измерения концентрации субмикронного аэрозоля в регионе. Были выявлены три режима загрязнения воздушного бассейна г. Кисловодска: типичный для летнего сезона режим регионального загрязнения, характерная для зимнего сезона ситуация, когда загрязнение городской атмосферы определяется местными (городскими) источниками, и найденный при неблагоприятных метеорологических условиях режим, когда в отдельных районах города образовывались локальные зоны с очень высокой концентрацией аэрозоля.

На территории г. Кисловодска и в других городах КавМинВод было организовано несколько пунктов мониторинга состава пыльцы растений с целью оценки концентрации биоаэрозолей – аллергенов.

На КВНС ИФА и в г. Кисловодске проводились измерения спектральной прозрачности и индикатрисы яркого неба в области солнечного ореола.

Экспериментальные исследования в регионе КавМинВод выполнялись с помощью созданного нами аппаратурного комплекса.

Основные результаты указанных исследований были доложены в апреле 1989 г. на организованной А.М. Обуховым конференции «Состояние и охрана воздушного бассейна курортных районов».

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ВЕТРОПЕСЧАНОМ ПОТОКЕ

Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Д.В. Бунтов
Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва, gengor@ifaran.ru

На опустыненных территориях взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью осуществляется через ветропесчаный поток. Основным процессом в ветропесчаном потоке является сальтация. Исследование сальтации отдельных песчинок осуществлялось с использованием скоростной видеосъёмки. Разработана модель переноса песчинок, позволившая изучать влияние вариаций параметров задачи на траектории песчинок. Решена обратная задача динамики сальтирующих песчинок. По данным скоростной видеосъёмки восстановлен вертикальный профиль концентрации сальтирующих песчинок. Обнаружено явление стохастической резонансной сальтации. Обсуждается процесс переноса сальтирующих песчинок в нижнем миллиметровом слое атмосферы.

Выполнено исследование вариаций суммарной концентрации и функции распределения по размерам сальтирующих песчинок в нижнем и верхнем слоях сальтации. Определена «мгновенная» (временное разрешение 1 с) пороговая скорость сальтации на опустыненных территориях.

Изучено явление аномально высокой электризации ветропесчаного потока. Показано, что модули плотности электрического тока сальтации на разных уровнях коррелируют друг с другом теснее, чем сами токи. Получена оценка удельного заряда песчинок в нижнем слое сальтации с учетом знакопеременности токов сальтации.

Выполнены измерения плотности поверхностного заряда и объёмного заряда в нижнем слое сальтации. Построены вертикальные профили электрических характеристик ветропесчаного потока.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

Г.И. Горчаков, Е.Г. Семутникова, Е.С. Байкова, А.В. Карпов
Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва, gengor@ifaran.ru

По данным экологического мониторинга в 2002 – 2012 гг. на сети автоматических постов контроля качества атмосферного воздуха ГПБУ «Мосэкомониторинг» в г. Москве и Подмосковье проанализирована временная и пространственная изменчивость концентраций газовых компонент загрязнения аэрозоля (PM10) в московском регионе. Выполнен статистический анализ вариаций концентраций примесей. Сопоставлены уровни загрязнения приземной атмосферы в различных районах города и в Подмосковье.

Мониторинг на телебашне Останкино позволил восстановить вертикальные распределения концентраций угарного газа и оксидов азота в пограничном слое городской атмосферы.

Изучены вариации среднего суточного хода концентраций примесей. На примере угарного газа охарактеризованы недельные циклы среднесуточной концентрации и суточного хода концентрации угарного газа.

Представлены данные о вариациях газового и аэрозольного загрязнения задымленной городской атмосферы в блокирующем антициклоне летом 2010 г.

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В МЕГАПОЛИСАХ МОСКВЫ И ПЕКИНА И ФОНОВЫХ УСЛОВИЯХ

Гречко Е.И., Ракитин В.С., Фокеева Е.В, Джола А.В., Горчилина А.В. Юрганов Л.Н.,(США)
Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва, eigrechko@gmail.com
JCET Research Group: UMBC, MD, USA

Спектроскопические измерения содержания CO и CH_4 в толще атмосферы проводятся в Лаборатории атмосферной спектроскопии (ЛАС) ИФА им. А.М. Обухова РАН в Москве (ИФА), на Звенигородской научной станции (ЗНС) соответственно с 1974 и 1970 г., а также в Пекине с 1992 г., на фоновых пунктах Кисловодская высокогорная научная станция (КВНС), гора Шатжатмас на Северном Кавказе с 1986 г, и международной обсерватории ZOTTO, поселок Зотино Красноярского края с 2008 г.

В докладе представлены результаты изучения дневных и сезонных вариаций в типичных и аномальных условиях атмосферного загрязнения Москвы и Пекина, а также результаты анализа долговременных тенденций этих газовых примесей.. Установлено убывание содержания CO в атмосфере Московского мегаполиса, как в самом городе, так и на ЗНС, со скоростью 2-3% в год в период 2001-2012 гг.. В Пекине тренд содержания CO оказался статистически незначим для периода 1992-2012 гг. Уровень загрязнения атмосферы Московского мегаполиса CO в 2-3 раза ниже, по сравнению с Пекином.

Влияния эмиссий Москвы на содержание CO и CH_4 в Звенигороде невелико, <5% случаев от числа всех измерительных дней приводят к статистически значимому превышению содержания примесей на ЗНС, этот вывод подтверждает возможность использования данных ЗНС в качестве фоновых.

Исследование аномальных случаев загрязнения атмосферы Московского мегаполиса во время пожаров лета 2010 г. позволило изучить влияние пожаров на качество воздуха в Москве и получить оценки эмиссий примесей от пожаров. Представлены результаты валидации наземных и спутниковых (сенсоры MOPITT, AIRS) спектроскопических измерений содержания CO. Также в докладе представлены примеры типичных и аномальных вариаций содержания CO и CH_4 в фоновых условиях Северного Кавказа и Сибири.

СТАТИСТИКА ВОДНОСТИ ПОЛЕЙ ОБЛАКОВ

Ю.А.Довгалюк[1], *А.А. Игнатьев*[2]
[1] Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, dovgaluk35@mail.ru
[2] ОАО «Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ»

Функция распределения метеорологических параметров в облачных полях во многом определяет параметризацию подсеточных процессов в моделях прогноза погоды и климата из-за значительной изменчивости облачной фракции на всех масштабах. В настоящей работе представлены результаты численных исследований статистики поля водности, полученных с помощью LES моделирования (Довгалюк, Игнатьев 2011,2012). Модель основана на решении трехмерных уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска во вращаюшейся системе координат. В качестве подсеточной турбулентной модели использовалась модель Дирдорфа (Deardorff 1980), а для вычисления водности применялась конденсационная схема (Sommeria, Deardorff 1977). Расчетная область представляла собой параллелепипед с горизонтальными размерами 5 км и вертикальным 3.5 км. На боковых границах ставились периодические граничные условия, верхняя граница – непроницаемая без трения, а на подстилающей поверхности задавались температура, полное влагосодержание и применялась параметризация Монина-Обухова для расчета потоков тепла, влаги и импульса. В расчетах были рассмотрены поля облаков пассатной зоны и средних широт (2-3 балла) с нижней кромкой до 900 м и мощностью до 1500 м. По результатам расчетов было выявлено, что профиль логарифма функции распределения (плотности вероятности) водности $f(Q_l)$ хорошо аппроксимируется прямой, имеющей один характерный излом в некоторой точке на оси водности Q_B. Это означает, что эта функция имеет вид убывающей экспоненты, скорость убывания которой в точке Q_B скачком возрастает. Физически это может означать, что в облачном поле вероятность появления водности большей Q_B резко падает. Если предположить, что бóльшая водность связана с наиболее крупными облаками, то вероятность появления наиболее крупных облаков также резко падает по сравнению с вероятностью появления облаков малых и средних размеров. Сама величина Q_B может использоваться для обезразмеривания статистических характеристик (рис. 1).

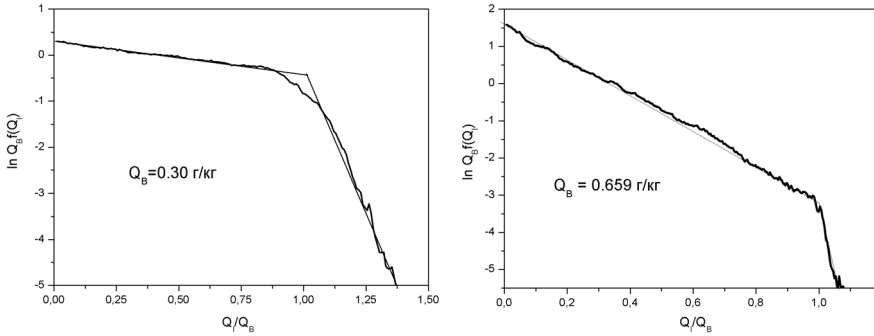


Рис. 1. Характерные функции распределения плотности вероятности водности полей облаков в пассатной зоне (слева) и в средних широтах (справа), полученные по результатам LES моделирования.

Необходимо заметить, что похожее поведение функции распределения отмечалось и при исследовании распределения облаков по размерам с помощью LES моделирования в работах (Cahalan, Joseph 1989; Neggers et al. 2003), где также выявляется излом профиля функции распределения по размерам при некотором характерном размере облака. Однако, в том случае функция распределения по размерам имела вид степенной функции, где показатель степени менялся скачком в точке излома. Возможно, природа этих явлений одна и может быть как-то связана с образованием турбулентных когерентных структур большого масштаба (порядка высоты подоблачного слоя).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довгалюк Ю.А., Игнатьев А.А.(2011). *К использованию LES модели для исследования характеристик полей кучевых облаков*. // Труды ГГО, Вып. 564, с. 126-146.
2. Довгалюк Ю.А., Игнатьев А.А. (2012). *Некоторые особенности статистики водности полей облаков неглубокой конвекции*. // Труды ГГО, Вып. 566, с. 128-138.
3. Deardorff J.W. (1980). *Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model* // Boundary-Layer Meteorology, v. 18. P. 495-527
4. Cahalan R. F., Joseph J. H. (1989). *Fractal Statistics of Cloud Field* //Mon. Wea. Rev., v. 117, pp. 261–272.
5. Neggers R.A.J, Jonker H.J.J., Siebesma A.P. (2003). *Size Statistics of Cumulus Cloud Populations in Large-Eddy simulation*. // Journal of the Atmospheric Science, v. 60, N 15, pp. 1060-1073.
6. Sommeria, G., Deardorff J. W. (1977). *Subgrid-scale condensation in models of non-precipitating clouds*. // J. Atmos. Sci., v. 34, pp. 344–355.

МАЛЫЕ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Н.Ф.Еланский
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, n.f.elansky@mail.ru

Северная Евразия в последние годы становится объектом повышенного внимания в связи с возможными изменениями естественных биологических циклов и состояния климатической системы под влиянием человеческой деятельности. Уже действует несколько международных программ и проектов, направленных на изучение происходящих здесь процессов. Готовится новый крупный проект “Пан-Евразийский эксперимент” (PEEX), который объединит специалистов в различных областях науки для комплексного изучения взаимодействия атмосферы и экосистем в условиях антропогенного прессинга. Во всех ведущихся и планируемых исследованиях важное место занимают наблюдения газового и аэрозольного состава атмосферы. ИФА им. А.М. Обухова РАН является одним из важнейших поставщиком информации о составе атмосферы в этом регионе. За последние 35 лет были оборудованы 3 станции мониторинга содержания в воздухе ключевых газов и аэрозолей: Высокогорная фоновая станция Кисловодск на Северном Кавказе, станция Звенигород в центре Европейской территории России, Московские станции на территории Метеообсерватории МГУ и в здании ИФА РАН. В сотрудничестве с отечественными и зарубежными партнерами ведутся регулярные наблюдения на станции Ловозеро (Полярный геофизический институт КНЦ РАН) и в центре Сибири на 300-метровой вышке в Зотино (Институт леса СО РАН, Институт биогеохимии Макса Планка, Германия). Совместно с ВНИИ железнодорожного транспорта создана передвижная железнодорожная лаборатория, на которой выполнено 15 международных экспериментов TROICA по изучению пространственной структуры распределения примесей различного масштаба над континентом. Для исследования эмиссий примесей в атмосфере, их переноса, вертикального перемешивания, химической трансформации и воздействия на состояние растительности проводились многочисленные полевые эксперименты.

Конкретные результаты, полученные в последние годы, будут представлены сотрудниками отдела. Но следует отметить, что значительная часть полученного в предыдущие годы экспериментального материала либо продолжает обрабатываться, либо еще ждет такой обработки и осознания. Крупные комплексные международные эксперименты, такие

как “Карпаты”, “TRIDES”, “TROICA” требовали много сил и времени на обеспечение высокого качества данных наблюдений. В условиях недостатка времени самое серьезное внимание обращалось на создание электронных баз данных, включающих не только результаты измерений, но и дополнительную метеорологическую, радиационную и другую информацию, необходимую для анализа и интерпретации данных. Тем не менее, можно отметить целый ряд принципиально важных результатов, которые были получены впервые и раскрывают закономерности пространственного распределения атмосферных составляющих над территорией России и его временную изменчивость.

Продолжительные измерения озона, окислов азота на Высокогорной станции показали наличие трендов, сильно отличающихся от наблюдаемых на горных станциях в Центральной Европе и на равнинных станциях. Знак и величина трендов O_3, NO_2 в свободной атмосфере в значительной степени зависят от особенностей крупномасштабной атмосферной циркуляции и, в меньшей степени, от антропогенного влияния. Анализ всей совокупности наблюдений озона в Сибири показал, что здесь активнее, чем в других регионах планеты, идет сухое осаждение O_3 на подстилающей поверхности. Т.е., Сибирь в целом является стоком озона в отличие от Европы, Северной Америки и остальной территории Азии, где превалируют процессы его фотохимической генерации. Новые представления относятся к континентальным особенностям распределения примесей, дальнему переносу загрязнений в высокие широты, влиянию городов на состояние атмосферы на их территории и окружающей местности, интенсивности антропогенных и естественных источников газовых и аэрозольных примесей.

Проведенные в ИФА РАН наблюдения и их анализ используются, в частности, для формирования программ и планов будущих крупных национальных и международных экспериментов.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИГРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ ВОДЯНОГО ПАРА С ДОЧЕРНИМИ ПОЛЯМИ КАК НЕОБХОДИМЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Ермаков Д.М.[1,2], *Шарков Е.А.*[2]
[1]Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино
[2]Институт космических исследований РАН, Москва

Дистанционное изучение первичных форм тропического циклона (ТЦ) и его дальнейшей эволюции в развитую форму ТЦ, а также детального исследования структурных, динамических и термодинамиче-

ских особенностей тропического возмущения непосредственно в момент резкой (и неожиданной для наблюдателей) интенсификации занимает особое место в программах дистанционного мониторинга атмосферных катастроф

К настоящему времени существуют многочисленные попытки выработки универсального критерия зарождения и достижения зрелой формы ТЦ с помощью феноменологического анализа оптических сигнатур облачных систем, которые легли в основу распознавания признаков зрелости ТЦ и его динамических характеристик и используются в оперативном анализе по настоящее время (например, известный алгоритм Дворака). При этом, однако, в этих алгоритмах полностью отсутствует информация об энергетическом мощном источнике, способным за короткий промежуток времени обеспечить интенсификацию ТЦ. Принципиально новым шагом в изучении дистанционных критериев генезиса ТЦ следует считать результаты комплексных многочастотных оптико-ИК-микроволновых спутниковых исследований эволюции оптического образа ТЦ в поле интегрального водяного пара, при анализе которых обнаружен фундаментальный вклад малоинерционного, с одной стороны, и, с другой стороны, мощного источника энергии, за счет которого происходит формирование зрелых форм тайфунов. Этим источником оказалось поле интенсивно мигрирующего интегрального водяного пара с высокой интенсивностью тропической зоны земной атмосферы. Горизонтальный перенос водяного пара осуществляется потоками глобальной циркуляции в западном направлении (в районе экватора), а джетовыми компонентами этого потока осуществляется поддержка функционирования зрелых форм ТЦ [Шарков, 2010; Шарков и др., 2008, 2011]. Для полновесного экспериментального доказательства этого положения необходимо исследование эволюции индивидуального тропического возмущения в поле интенсивно мигрирующего интегрального водяного пара тропической зоны и зоны умеренных широт земной атмосферы. Сложность проблемы заключается в том, что необходимо провести синхронный анализ дистанционной спутниковой информации двух стохастических процессов, обладающих принципиально различными пространственно-временными масштабными и структурными характеристиками. Первый процесс – тропический циклогенез рассматривается как стохастический набор случайных событий (объектов), а именно, стохастический генезис тропических циклонов [Sharkov, 2012], и второй – как пространственное глобальное поле интегрального водяного пара со значительной пространственно-временной вариабельностью [Шарков и др., 2011]. Совместный анализ двух указанных процессов должен быть проведен на минимальном временном интервале и

только в режиме анимационного видеоряда. Поиск адекватного временного интервала и создание высокоскоростного анимационного видеоряда представляют собой одну из наиболее сложных задач обработки данных спутниковых микроволновых наблюдений.

На основе предложенного алгоритма построения глобальных радиотепловых полей системы океан-атмосфера высокой пространственно-временной детальности по спутниковым измерениям авторами представлен программный комплекс, реализующий описанные алгоритмы, и позволивший впервые получить глобальные анимированные радиотепловые поля с шагом по времени 1,5 часа и пространственным разрешением 0,2°. Методика была успешно опробована на практике при анализе данных SSM/I формата GRID (данные на регулярной градусной сетке с шагом 0,5°), полученных за период наблюдений 23 августа – 03 сентября 2005 г. (ТЦ Katrina) со спутников F13, F14, F15 серии DMSP. На основе разработанного программно-алгоритмического подхода решена важная задача о нахождении «мгновенного» источника скрытой энергии при интенсификации ТЦ Katrina (2005) по данным микроволнового спутникового зондирования комплекса SSM/I миссии DMSP (NASA). Усовершенствованный алгоритм отработан и проиллюстрирован на примере обработки периода измерений SSM/I за 28 июля – 26 августа 2000 г. (ТЦ Alberto).

В работе полностью были подтверждены основные положения модели «верблюда» и модели «джетовой» подпитки основной кинематической составляющей ТЦ из основного поля водяного пара, которое может быть, как выяснялось, не только экваториальным полем водяного пара во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК) (как это считалось ранее), но и может быть сформировано в умеренных широтах, от 25 до 50 градусов широты за счет очень сложных перестроек глобальной циркуляции. При этом отметим, формирование этого поля подпитки ТЦ может осуществляться существенно различными способами. Это могут быть, как мы показали, выбросы полей водяного пара из зоны ВЗК; могут быть поля водяного пара, присоединенные к слабым и быстро затухающим тропическим возмущениям; могут быть продукты взаимодействия мезомасштабных полей сильно различающихся влажностей и формирования крупномасштабных циклонических систем в умеренных широтах. Существование такого вида полей может принципиально менять как структуру самого ТЦ, так и траекторию его движения. Отметим, однако, что в существующих математических моделях эволюции ТЦ и его траекторий подобные компоненты не рассматриваются, что, конечно, ставит результативность существующих моделей под сомнение.

Литература

[Ермаков и др., 2007] Ермаков Д.М., Раев М.Д., Суслов А.И., Шарков Е.А. *Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан-атмосфера* // Исследования Земли из космоса. 2007. № 1.С.7-13.

[Шарков, 2010] Шарков Е.А. *Дистанционные исследования атмосферных катастроф* // Исследование Земли из космоса. 2010. №1. С. 52-68.

[Шарков и др., 2008] Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. *Эволюция тропического циклона Gonu и его связь с полем интегрального водяного пара в экваториальной области* // Исследование Земли из космоса. 2008. № 6. С. 25-30.

[Шарков и др., 2011] Шарков Е.А., Ким Г.А., Покровская И.В. *Эволюция тропического циклона Hondo в поле экваториального водяного пара с использованием мультиспектрального подхода*. Исследование Земли из космоса. 2011. № 1. С. 22-29.

[Sharkov, 2012] Sharkov E.A. *Global Tropical Cyclogenesis*. The 2nd Edition. Springer/PRAXIS. Berlin, Heidelberg, London, New York etc. 2012. 650 p.

О РОЛИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ В УСИЛЕНИИ СТРАТОСФЕРНО-ТРОПОСФЕРНОГО ОБМЕНА

В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, Е.С. Савельева

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск,
kapitosha89@gmail.com

14 апреля 2010 г. началась взрывная фаза извержения исландского вулкана Эйяфьятлайёкудль, продолжавшаяся до конца мая. Максимальная зарегистрированная высота выброса продуктов извержения составляла 9,3 км при высоте тропопаузы около 11 км, т.е. выброс не достиг стратосферных высот. Тем не менее, в эти дни в стратосфере на юге Германии лидаром регистрировалось значительное, на три-четыре порядка, увеличение коэффициентов обратного рассеяния до высоты 14,5 км [1]. Попадание вулканогенного аэрозоля из верхней тропосферы в стратосферу возможно в результате интенсивного конвективного прогрева и разрушения тропопаузы. Такой прогрев могут обеспечить разогретые вулканические облака, растекающиеся в верхней части эруптивной колонны. Кроме остаточного тепла после вулканического взрыва в газо-пепловом облаке может происходить дополнительный радиационный нагрев, вызванный поглощением солнечного излучения «темным» аэрозолем, пеплом, а так же сажей, образующейся в центральной раскаленной части эруптивной колонны при термическом разложении метана [2]. Возникающие над разогретым вулканическим облаком конвектив-

ные потоки способны разрушить тропопаузу и поднять легкие фракции вулканогенных аэрозолей на стратосферные высоты.

На примере извержений исландского вулкана Эйяфьятлайёкудль в апреле-мае 2010 г. прослежено влияние вулканических облаков на исчезновение тропопаузы. С использованием модели NOAA HYSPLIT получены траектории перемещения вулканических облаков и в ряде регионов их прохождения выявлены изменения температурного профиля. Проанализировано поведение приземных концентраций озона (ПКО) в этих районах. Установлено, что аномальные увеличения ПКО являлись следствием прорывов разогретой тропопаузы над ними.

1. Trickl T., Giehl H., Jäger H., Vogelmann H. *35 years of stratospheric aerosol measurements at Garmisch-Partenkirchen: from Fuego to Eyjafjallajökull, and beyond* // Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2012. № 12. P. 23135-23193.
2. В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, П.К. Куценогий, Е.С. Савельева. *Вулканогенный нанодисперсный углеродный аэрозоль в стратосфере* // Химия в интересах устойчивого развития (в печати).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОСФЕРЫ И ВОДОЗАПАСА ОБЛАКОВ КОМПЛЕКСОМ «МИКРОРАДКОМ»

Кадыгров Е.Н., Агапов Ю.В., Горелик А.Г., Князев А.К., Некрасов В.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А., Троицкий А.В., Шапошников А.Н.
«Центральная аэрологическая обсерватория», Долгопрудный,
enkadygrov@gmail.com

В 2011-2012 г.г. в Центральной аэрологической обсерватории был разработан наземный измерительный комплекс, получивший патентованное название «Микрорадком». Работа комплекса основана на использовании особенностей распространения радиоволн диапазона 10 - 60 ГГц. Он обеспечивает практически непрерывные измерения профилей температуры тропосферы в диапазоне высот 0 - 10 км (с детализацией по отдельному каналу профилей температуры атмосферного пограничного слоя в диапазоне высот 0 - 1.6 км), общего содержания водяного пара (влагозапаса атмосферы), общего содержания жидкокапельной воды в атмосфере (водозапаса облаков), интенсивность жидких осадков, а также видеозапись облаков в зенитном направлении.

Непрерывные измерения с помощью комплекса «Микрорадком» производятся на территории Центральной аэрологической обсерватории в непосредственной близости к аэрологической станции «Долго-

прудный» с 1 марта 2012 года. Одновременно фиксируются приземные значения температуры, влажности и давления. В докладе в основном анализируются данные, полученные в зимний период 2012-2013 г.г., при этом особое внимание будет уделено анализу полученных данных о водозапасе зимних облаков с учетом непрерывных данных о профилях температуры тропосферы. Представлены будут также основные технические характеристики нового измерительного комплекса и результаты сравнений с данными радиозондирования.

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. *Радиоизлучение Земли как планеты.* М., Наука, 1974. с.187.
2. Кадыгров Е.Н., Агапов Ю.В., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В. *Радиометрический комплекс миллиметрового диапазона для мониторинга термодинамических характеристик тропосферы*. Труды 5-й Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром,
3. 26-28 июня 2012 г., с. 353-357.
4. Ulaby F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive.* V. 1. Microwave Remote Sensing. Fundamentals and Radiometry.// Reading, M.A.: Addison – Wesley, 1981, 456 P.

КОНТРОЛЬ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Кашин Ф. В., Арефьев В. Н., Вишератин К.Н., Каменоградский Н. Е., Сизов Н.И., Тереб Н.В.
НПО «Тайфун», Обнинск, nikita@typhoon.obninsk.ru

Начатый в 1980 году мониторинг состава атмосферы в настоящее время включает измерения основных радиационно-активных составляющих атмосферы (водяного пара, окиси и двуокиси углерода, метана, озона, двуокиси азота и аэрозольной оптической толщи) на научно-исследовательских станциях, созданных «НПО Тайфун» в центральной части Европейской территории России (Обнинск), в центре Евразии (Иссык-Куль) и в Антарктиде (Новолазаревская). На станции Новолазаревская рамках работ по ФЦП «Мировой океан» в отдельные периоды были разработаны и реализованы программы исследований при участии ФГБУН «Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН» и «Арктического и антарктического научно-исследовательского института» и ФБГУ «Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова».

Одной из последних экспериментальных разработок «НПО «Тайфун» является комплекс МР-32, совмещающий возможности проведе-

ния экспериментальных исследований аэрозольной оптической толщи, содержания основных газовых компонент в толще атмосферы и их концентрации в приземном воздухе.

Значительное внимание в «НПО «Тайфун» уделяется разработке модельных методов интерпретации данных систематический измерений, результаты которых будут представлены в докладе.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ САЖЕВОГО АЭРОЗОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НАД ЕВРОАЗИАТСКИМ КОНТИНЕНТОМ В 2004 – 2010 гг.

В.М. Копейкин[1], Ван Генчень[2], Т.Я. Пономарева[3]
[1]Институт физики атмосферы им. Обухова РАН, Москва, kopeikin-ifa@mail.ru
[2] Институт физики атмосферы АН Китая, Пекин
Гидрометцентр России, Москва

Проведены исследования изменчивости уровня загрязнения сажевым аэрозолем приземного воздуха в 2 мегаполисах (г. Пекин и г. Москва) в 2004 - 2010 гг. и вариаций сажи, полученных с помощью вагона-лаборатории, вдоль железной дороги от Москвы до Владивостока и от Мурманска до Адлера. Измерения проводились в зданиях Института физики атмосферы РАН в Москве и Института физики атмосферы АН Китая в рабочие дни недели в дневное время 1 раз в сутки.

Вариации единичных измерений концентрации сажи за 7 лет в Пекине находятся в пределах 0,1 – 77 мкг/м^3, а сезонная изменчивость концентрации сажи не превышает 10%. Содержание сажи в воздушном бассейне г. Пекина максимальное в зимний и осенний периоды и минимальное весной и летом, соответственно, и в среднем за весь период наблюдений составляет: 10,4, 9,7, 8,8 и 9,0 мкг/м^3.

Таблица

Среднегодовая изменчивость концентрации сажи в приземном слое воздуха г. Пекина и г. Москвы в 2004 – 2011 гг. (мкг/м^3). Среднее – средняя концентрация сажи за период 2004 – 2010 гг.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Среднее
г. Пекин	11,0	8,6	8,9	9,0	9,1	10,6	7,7	-	9,4
г. Москва	4,2	4,4	4,6	3,6	2,9	3,1	3,7	2,6	3,8

В таблице приведена среднегодовая изменчивость концентрации сажи в приземном слое воздуха г. Пекина и г. Москвы в 2004 – 2011 гг. Содержание сажи в воздушном бассейне г. Пекина в 2,5 раза выше, чем в г.

Москве. В г. Москве с течением времени наблюдается заметное снижение загрязнения воздуха сажей: в 1,7 раза за последние 5 лет.

В Гидрометцентре России построены ежедневные 5-суточные обратные траектории переноса воздушных масс на уровне 850 мб для г. Москвы и г. Пекина за период 2004 – 2010 гг. Повторяемость переноса воздушных масс для г. Москвы из западного сектора в среднем за 7 лет максимальна и составляет 36%. В летний сезон в среднем за период 2004 – 2010 гг. повторяемость переноса воздушных масс не превышает 12%, в то время как летом 2010 г. за счет нахождения устойчивого антициклона в центре европейской части России повторяемость была почти в 3 раза выше (32%). Анализ траекторий за 7 лет для г. Пекина показал, что загрязнение сажевым аэрозолем воздушного бассейна г. Пекина растет за счет переноса из-за пределов города от больших промышленных городов и индустриальных центров при перемещении воздушных масс из сектора от юго-запада до юго-востока. Перенос воздушных масс в г. Москву северного направления из арктических районов очищает воздух города от сажи, напротив, воздушные массы из юго-восточного сектора во время лесных пожаров и горения торфяников воздух города сильно загрязняют. Так, уровень загрязнения приземного слоя воздуха в г. Москве в августе 2010 года в 6 раз выше, чем в среднем за период 2000 – 2009 гг. и в 2 раза превышает максимальное значение за этот период. Вклад регионального загрязнения сажей атмосферы г. Москвы, по наблюдениям в 1993 – 2007 гг., составляет 25 -30%.

Измерения сажевого аэрозоля с помощью вагона-лаборатории в период 2004–2010 гг. проведены в весенний (TROICA-8), летний (TROICA-11, 12) и осенний (TROICA-9, 13) периоды, а также по маршруту Москва-Мурманск-Адлер-Москва (TROICA-14) и вокруг г. Москвы вдоль окружной железной дороги (TROICA-10). Для всех экспедиций построены 5-суточные траектории переноса воздушных масс и осуществлен анализ влияния воздушных масс, переносимых из разных областей, на изменение уровня содержания сажи в приземном слое воздуха городов и сельских мест.

НАБЛЮДЕНИЕ ПОЛЯРНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ НАД Г. ОБНИНСКОМ В ДЕКАБРЕ 2012 г.

В.А. Коршунов, Д.С. Зубачев
НПО “Тайфун”, Обнинск, korshunov@typhoon.obninsk.ru

Во время существования блокирующего антициклона над территорией европейской части и западной Сибири 15-23 декабря 2012 г. в г. Обнинске (55.1º с.ш., 36.7º в.д.) проведена серия лидарных измерений

аэрозольных характеристик (12-40 км), концентрации озона (12-35 км) и температуры средней атмосферы (30-60 км). В ряде случаев на высоте около 21 км отмечалось появление полярных стратосферных облаков (ПСО) типа NAT - I_a. Для вертикального профиля озона была характерна слоистая структура и колебания интегрального содержания озона в слое 12-35 км. Температура в области стратопаузы в начале периода измерений была на 20-30º выше модельных среднемесячных значений. В нижней части температурного профиля в течение всего периода измерений наблюдалось отклонение обратного знака. Анализ спутниковых и других данных показал, что в период измерений имело место малое стратосферное потепление, сопровождаемое ослаблением и деформацией (изгибом) полярного стратосферного вихря, в результате чего в нижней стратосфере над г. Обнинском установились температуры ниже пороговой для образования ПСО.

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ГАЗО – АЭРОЗОЛЬНЫХ ЭПИЗОДОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА

Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Глазкова А.А., Нахаев М.И.
Гидрометцентр России, Москва, muza@mecom.ru

На фоне сезонно-суточных периодических колебаний воздушного загрязнения эпизоды загрязнения с многократным превышением фоновых уровней или гигиенических нормативов на представительной части рецепторов являются выраженным ответным сигналом на усиленное многофакторное воздействие с образованием не содержавшихся в выбросах и более токсичных по сравнению с эмиссиями компонентов. Такого рода нарушения равновесия экологической системы сопровождаются трудно документируемым негативным воздействием на людей и живую природу, возрастающим в области критических уровней при малых количественных изменениях. Обсуждаются сезонные предпосылки, вклад природных и антропогенных источников в формирование эпизодов загрязнения, их ранжирование по интенсивности и образующим основным ингредиентам, а также регулирующие механизмы в эпизодах, сформированных за счет местных источников и дальнего переноса примесей.

ПЕРЕНОС КОРОТКОВОЛНОВОЙ И ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В ГМО ТИКСИ И ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА РОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЯХ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС»

В.Ю. Кустов, А.П. Макштас, П.В. Зиновьев Н.С.
Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, kustov@aari.ru

На территории бывшего Советского Союза с 1955 года работают 160 актинометрических станций, измеряющих прямую, суммарную и рассеянную солнечную радиацию для целей мониторинга состояния окружающей среды. В 2009 году в Гидрометеорологической обсерватории (ГМО) Тикси была организована станция Базовой сети радиационных наблюдений ВМО. Сеть БСРН основана в 1992 году и предназначена для обеспечения данными непрерывных высокоточных измерений длинноволновой и коротковолновой радиации программ, направленных на мониторинг климата. В настоящее время в состав БСРН входит 51 станция.

Для оценки репрезентативности данных, полученных в различные периоды наблюдений, в ГМО Тикси, начиная с 2009 года, проводятся параллельные актинометрические наблюдения как с помощью российских актинометрических датчиков, разработанных в 1950-х годах, так и с помощью современных датчиков БСРН. В докладе приведены результаты сравнения данных измерений прямой, суммарной и рассеянной солнечной радиации, полученных обоими измерительными комплексами.

Во второй части доклада показаны результаты сравнения данных об альбедо и составляющих радиационного баланса, полученных на дрейфующей станции «Северный Полюс - 39» и в ГМО Тикси за период с октября 2011 по август 2012 года. Как следует из анализа данных, величины альбедо подстилающей поверхности по данным СП изменяются в пределах от 0.95 в весенний период до 0.58 в период максимального таяния. Альбедо тундры в Тикси составляет от 0.93 весной, при наличии снежного покрова, до 0.1 летом. Сопоставление величин длинноволнового радиационного баланса показало превышение радиационного выхолаживания подстилающей поверхности в районе ГМО Тикси зимой на порядок.

В заключение приведены результаты спектральных измерений приходящей, отраженной и проходящей через ледяной покров солнечной

радиации по данным наблюдений на дрейфующих станциях «Северный Полюс – 35 – 39», показавшие, что даже при наличии сплошного ледяного покрова величина проникающей под лед коротковолновой радиации может составлять от 0.5 до 7 Вт/м^2, что сравнимо с существующими оценками турбулентного потока тепла к нижней границе ледяного покрова (2 Вт/м^2).

СВЯЗЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С ИЗМЕНЕНИЯМИ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРЫ И НА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД АЗИАТСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ В КОНЦЕ XX И НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ

Логинов С.В., Ипполитов И.И., Харюткина Е.В.
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск,
ceo@imces.ru

Тепловой режим земной поверхности формируется под влиянием солнечной радиации, характеристик атмосферы, подстилающей поверхности.

Оценки радиационного баланса на верхней границе атмосферы B_{TOA} и теплового баланса B_S, усредненные по азиатской территории России (АТР), и рассчитанные с использованием данных реанализа JRA-25 приведены в таблице. Жирным шрифтом выделены значимые оценки (α=0,05).

Таблица. Сезонный ход оценок B_{TOA} и B_S (Вт/м^2) и их трендов (Вт/м^2 за 10лет) над АТР за период с 1979 по 2008 гг.

Месяцы	Верхняя граница атмосферы				Поверхность			
	B	σ_B	B_{tr}	σ_{Btr}	B	σ_B	B_{tr}	σ_{Btr}
январь	-162,7	4,2	-1,26	0,95	1,15	1,09	-0,03	0,06
февраль	-134,5	3,4	-0,40	0,77	0,55	1,12	-0,01	0,06
март	-87,0	3,8	**-1,80**	0,76	-0,39	1,76	0,02	0,07
апрель	-21,1	2,4	-0,68	0,52	1,05	3,22	-0,02	0,10
май	63,0	2,5	-0,90	0,56	**4,83**	1,18	0,17	0,20
июнь	96,5	2,4	**-1,41**	0,47	**3,35**	1,18	-0,01	0,16
июль	66,8	2,4	-0,31	0,54	**1,56**	0,75	-0,02	0,04
август	-0,8	1,9	-0,47	0,45	0,98	0,72	-0,02	0,04
сентябрь	-72,6	2,5	-0,45	0,58	0,07	0,94	-0,01	0,04
октябрь	-135,5	2,3	**-1,27**	0,44	-0,27	1,38	0,00	0,06
ноябрь	-163,0	3,8	-1,17	0,88	-0,45	1,06	-0,03	0,06
декабрь	-171,1	2,5	-0,76	0,56	0,55	1,18	-0,00	0,06

Из таблицы следует, что B_{TOA} и B_S принимают наибольшие значения в летний период. По данным реанализа JRA-25 значимых трендов B_S на территории Западной Сибири не обнаружено: оценки тренда составили ~0,1 Вт/м^2/10 лет (σ = 0,6 Вт/м^2/10 лет).

Временной ход радиационного баланса B_{TOA} в интервале 1979-2008 гг. по данным реанализов (JRA-25, MERRA) и данным спутникового мониторинга (CERES), усредненных по АТР, приведены на рисунке.

Закономерности радиационного баланса определяются различными факторами, влияющими на его основные составляющие, одним из которых является облачность.

Сравнение за период 1979–2008 гг. межгодовой изменчивости баланса B_{TOA}, приходящей к поверхности коротковолновой радиации $Q_{\downarrow S}$, эффективного излучения E_{eff}, и общей облачности показало, что во временном ходе анализируемых величин достаточно четко можно выделить два подынтервала. В первом подынтервале над АТР и Западной Сибирью имеет место уменьшение общей облачности и соответствующий рост приходящей на поверхность коротковолновой радиации. Во втором подынтервале уменьшение величин B_{TOA}, $Q_{\downarrow S}$ и E_{eff}, сопровождается ростом общей облачности.

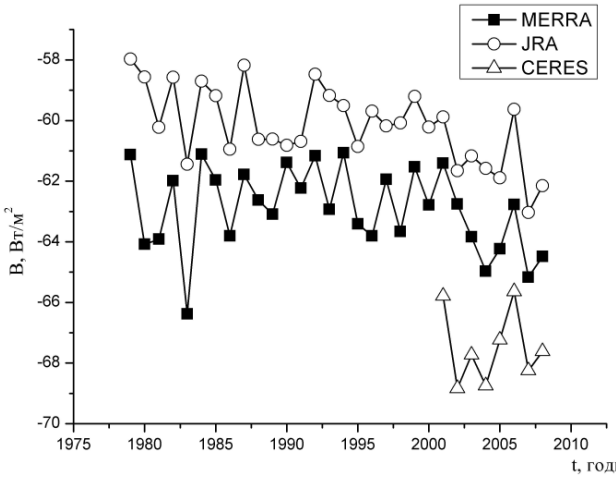


Рисунок. Временной ход радиационного баланса B_{TOA}

На исследуемой территории изменчивость потоков коротковолновой и длинноволновой солнечной радиации хорошо согласуется с изменчивостью общей облачности.

Были построены две регрессионные модели, связывающие изменчивость приземной температуры с изменчивостью радиационных потоков

на верхней границе атмосферы (модель «А») и на поверхности земли (модель «Б»). В обе модели в качестве предикторов включались индексы атмосферной циркуляции, а также общая облачность.

Применение регрессионной модели «А» позволяет описывать в холодный период года от 67 до 87% дисперсии приземной температуры.

Использование регрессионной модели «Б» показало, что радиационные факторы описывают 51% изменчивости приземной температуры. Степень влияния циркуляционных факторов на приземную температуру зависит от географических особенностей отдельных регионов АТР. Построенные регрессионные модели позволяют описать 65% изменчивости температуры при учете как циркуляционных, так и радиационных факторов.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГРОЗ

Д.А. Лысенко
НПО «Тайфун», Обнинск, lysenko@typhoon.obninsk.ru

О сейсмических проявлениях интенсивных атмосферных процессов известно давно, но в течение долгого времени сейсмические сигналы такого происхождения обычно рассматривались лишь как помехи при решении основных сейсмологических задач. В последние 1-2 десятилетия высказаны идеи о возможности использования сейсмических сигналов для оперативной регистрации таких быстротекущих опасных явлений как торнадо и шквальные ветры (см, например, [1, 2] и библиографию к этим работам). Поэтому стал актуальным систематический анализ сейсмических проявлений летних опасных конвективных явлений.

На базе институтов г. Обнинска имеются уникальные возможности одновременного анализа и сопоставления данных метеорологических наблюдений и сейсмических сигналов, связанных с атмосферными явлениями. Здесь располагается Геофизическая Служба РАН с сейсмической станцией и обширным архивом сейсмических данных, непрерывно пополняемым данными мировой сети. Следует упомянуть также Высотную метеорологическую мачту (ВММ) Института экспериментальной метеорологии и ВНИИГМИ (Институт гидрометеорологической информации Росгидромета) с соответствующим архивом.

В настоящей работе исследовались некоторые особенности сейсмических проявлений гроз. Рассмотрены эпизоды с сильными грозами над Обнинском 13 июня 2010 г. и 26 июня 2011 г., а также редкое явление - зимняя гроза 28 декабря 2012 г.

Использован ряд современных статистических методов обработки сигналов: детектор sta/lta, хи квадрат, метод максимального правдоподобия, а также полосовая и, так называемая, обеляющая фильтрация. Выявлены некоторые особенности сейсмических сигналов, связанных с грозами, позволяющие отличать их от традиционно изучаемых сигналов от землетрясений и сигналов техногенного происхождения. Обнаружена высокая корреляция между сейсмическими сигналами и вариациями атмосферного давления, а также между сейсмическими сигналами и скоростью ветра (0.89 и 0.9 соответственно). Интересно отметить, что для сейсмического сигнала характерно опережение вариаций давления (примерно на 8 минут).

На примере зимней грозы в Обнинске 28 декабря 2012 г. изучены особенности сейсмических сигналов, связанных с ударами грома, определен спектральный состав, характерная частота, длительность сигналов.

Литература:

1. Ингель Л.Х., Феофилактов В.Д., Ярошевич М. И. *Регистрация сейсмических сигналов, связанных с торнадо* //Докл. РАН. 2002. Т. 386. № 6. С. 813-817.
2. Ингель Л.Х., Ярошевич М.И., Бабкина В.Ф. *О сейсмических проявлениях конвективной облачности* // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 5. С. 689-695.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА НА ШЕЛЬФЕ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕГО РАЗГРУЗКИ ИЗ ДОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

Интерес к изучению цикла углерода в Арктике вызван климатическими изменениями, которые происходят в северных широтах и выражаются в повышении среднегодовой температуры воздуха, сокращении площади морских льдов, деградации вечной мерзлоты и увеличении стока рек. Данные экспедиционных исследований 2003-2007 гг. демонстрируют масштабную эмиссию метана из мелководной части шельфа в Восточно-Сибирском море и море Лаптевых [1]. Предполагается, что усиление эмиссии метана может быть следствием деградация подводных мерзлых пород и нарушения условий существования газгидратов на шельфе морей восточного сектора Арктики.

Считается, что подводная криолитозона Арктического шельфа сформировалась на суше в холодную эпоху во время понижения уровня моря, 18-20 тысяч лет назад (т.л.н.), а затем была им затоплена в результате повышения его уровня, примерно 6-8 т.л.н, [2]. Для расчетов теплового поля в осадочном слое и определения нижней границы криолитозоны на шельфе использовалась модель тепло- и влагопереноса в грунте ИФА РАН [3]. Были проведены расчеты от момента времени, предшествующего последней трансгрессии моря, 9 т.л.н., до 1948 г. Результаты численного моделирования показали возможность существования подводной криолитозоны на шельфе морей восточной Арктики, нижняя граница залегания которой изменялась от 460 до 210 м за весь период моделирования.

Далее придонная температура воды рассчитывалась на основе региональной модели Северный Ледовитый океан (СЛО) – Северная Атлантика, разработанной в ИВММГ СО РАН. В результате работы численной модели с использованием данных реанализа NCEP/NCAR была восстановлена система взаимодействия водных масс Северной Атлантики и СЛО с 1948 по 2010 г., включая циркуляцию вод в морях сибирского шельфа. По результатам расчета поступление аномально теплых атлантических водных масс в СЛО, начавшееся в конце 80-х годов, привело к повышению придонной температуры на Восточно-Сибирском шельфе. Однако увеличение температуры придонных вод за моделируемый период привело к незначительному (на 1-3 м) поднятию нижней границы мерзлоты и оттаиванию донных мерзлых отложений, образованных в результате регрессии моря.

С помощью модели теплопереноса в поддонном грунте, дополненной термобарическими условиями существования газгидратов метана [3], были рассчитаны границы возможной зоны стабильности гидратов на шельфе. При увеличении придонной температуры эта граница опускается, и в слое между ее первоначальным и текущим уровнем происходит возможное разложение гидратов с выделение газа. Газ, накопившийся между нижней границей мерзлоты и верхней границей зоны стабильности, может мигрировать вертикально вверх через разрывы в слое осадков, образуя дополнительный источник метана.

Для оценки масштабов эмиссии метана в атмосферу на шельфе морей восточной Арктики были проведены сценарные расчеты в предположении наличия диффузионного транспорта газа из донных отложений. Распределение растворенного метана в морской воде получено как решение адвективно-диффузионного уравнении для примеси с учетом процессов окисления. В первом сценарии предполагалось увеличение газовой проницаемости многолетних мерзлых донных осадков и посту-

пление растворенного метана из донных отложений равномерно по всей области шельфа в виде диффузионных потоков порядка 3 нмоль /м^2 [4]. Во втором сценарии были заданы экстремально высокие потоки из донных резервуаров порядка 1000 нмоль/м^2 в секунду, в соответствии с [5], где моделировался процесс разрушения поддонных газогидратных залежей в мелководных арктических областях на основе математической модели. При этом была рассмотрена часть Арктического шельфа с глубинами до 60 м, где по фактическим данным были зарегистрированы устойчивые аномалии растворенного метана, [1].

Выполненные сценарные расчеты позволили оценить возможные потоки метана в атмосферу. Получено, что максимальная эмиссия метана в атмосферу Арктического региона характерна для 2005 и 2007 годов. Данные наблюдений показывают, что в арктических морях в эти годы произошло формирование уникального теплового состояния поверхностного слоя воды, способствующего резкому сокращению площади, занимаемой морскими льдами в конце летнего периода. В численных экспериментах также значительно сократилась площадь льда, что могло способствовать повышенной эмиссии метана в атмосферу в эти годы. Полученные оценки эмиссии метана в атмосферу от рассмотренных нами источников в зависимости от года составили 20-86 килотонн в год за период открытой воды в первом эксперименте и 30–194 килотонн в год во втором.

Работа выполнена при поддержке междисциплинарного ИП СО РАН №109, проекта РФФИ № 11-05-01075-а.

1. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. *Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf* // Science. 2010. № 327. P. 1246-1250.
2. Romanovskii N. N., Hubberten H.W., Gavrilov A. V., Eliseeva A. A., and Tipenko G. S. *Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas* // Geo Mar. Lett. V. 25. P. 167–182, doi:10.1007/s00367-004-0198-6.
3. Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И. *Оценка отклика субаквальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке* //Доклады Академии Наук. 2011. Т. 441. № 5. С. 685-688.
4. Elliott S. Maltrud M, Reagan M., Moridis G., Cameron-Smith P. *Marine methane cycle simulations for the period of early global warming* // J. Geophysical Research. - 2011. V.16. G01010. doi:10.1029/2010JG001300
5. Reagan M. T., Moridis G. J. *Dynamic response of oceanic hydrate deposits to ocean temperature change* // J. Geophysical Research. 2008. V.113. C12023, doi:10.1029/2008JC004938.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ В ЕВРОПЕЙСКОМ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ РЕГИОНАХ РОССИИ

Медведева И.В.[1], *Перминов В.И.*[2], *Семенов А.И.*[2]
[1]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск
[2]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, meso@ifaran.ru, anasemenov@yandex.ru

Представлены результаты совместного исследования температурного режима атмосферы на высотах области мезопаузы (80-90 км), проводимого в ИФА им. А.М. Обухова РАН и ИСЗФ СО РАН в двух, разнесенных по долготе, среднеширотных регионах наблюдения.

Проведен сравнительный анализ данных наземных измерений вращательной температуры гидроксила, отображающей температуру атмосферы на высоте эмиссионного слоя гидроксила (~ 87 км). Для анализа использованы данные спектральных наблюдений гидроксильного излучения (полоса OH(6-2) 834.0 нм) на Звенигородской станции ИФА РАН (56N, 37E) и в Геофизической обсерватории (ГО) ИСЗФ СО РАН (52N, 103E) за период 2008-2012 гг. На обеих обсерваториях регистрация излучения гидроксила производится с помощью одинаковых светосильных дифракционных спектрографов, использующих приемники на ПЗС матрицах. Обработка данных измерений осуществляется по единой методике.

Выявлены широтно-долготные отличия вариаций температурного режима мезопаузы по данным наземных измерений для двух регионов наблюдения. Исследуются возмущения температуры области мезопаузы в периоды действия стратосферных потеплений. Проведено сопоставление данных наземных измерений температуры мезопаузы для двух регионов наблюдения со спутниковыми данными MLS Aura, v3.3, которое обнаружило систематическое занижение спутниковых данных по сравнению с наземными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-05-00153а).

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА И ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В г. ОБНИНСКЕ

Л. И. Милехин, Н. В. Тереб, В.Л. Милехин
НПО ”Тайфун”, Обнинск, lm@typhoon.obninsk.ru

Представлены результаты измерений концентрации приземного озона на исследовательской станции НПО «Тайфун» в г. Обнинске, расположенном немногим более 100 км к юго-западу от г. Москвы (55.1° с.ш., 36.6° в.д.; население порядка 105 тыс. чел.; крупных промышленных предприятий нет). При анализе этих результатов использованы данные о температуре, давлении, влажности, скорости и направлении ветра, регистрируемые на Высотной метеорологической мачте (ВММ) НПО «Тайфун» .

Для измерений концентрации приземного озона использовался хемилюминесцентный анализатор озона 3.02П1 компании «ОПТЭК», который дважды поверялся по европейскому стандарту (Env O3-41M № 1298). Его погрешность составляла Σ = 20% в интервале концентраций, превышающих 30 мкг/м^3, и = 6 мкг/м^3 при концентрациях менее 30 мкг/м^3 . С апреля 2010 года измерения проводились оптическим анализатором озона фирмы Thermo Scientific (Model 49i). Кроме того использовался для измерений оптический прибор Ф-105 (ОПТЭК). Результаты единичных измерений усреднялись за час, день, месяц и год.

Временной ход концентрации озона в приземном воздухе показывает большую изменчивость приземного озона, коэффициент вариации составляет 78, 26 и 12% соответственно для средних часовых, и климатически значимых месячных и годовых величин его концентрации.

Повышенные X>60 мкг/м^3 и минимальные X<12 мкг/м^3 концентрации озона заметно связаны с инверсией температуры. Кратковременные повышенные средние часовые концентрации озона, как правило, наблюдаются в конце лета и весной. В 2010 году при аномальных погодных условиях повышенные концентрации озона прослеживались большую часть года и их величины часто превышали высокие концентрации других лет. Учет данных этого года заметно увеличивает показатель линейного тренда.

В целом средняя годовая концентрация озона в климатически значимом диапазоне изменений средних часовых концентраций от 12 до 60 мкг/м^3, на который приходится 70% измерений, возросла в линейном приближении на ~45%.

Сезонные вариации концентрации озона носят заметно не регулярный характер, хотя в среднем в течение года четко прослеживаются два максимума: весенний в марте и летний в августе.

Относительная влажность является одним из основных предикторов приземного озона при прогнозе его концентраций. Связь [O3]макс с относительной влажностью обнаруживает одинаковую корреляцию (R = -0,66±0,06, Δоцен = 26,6 мкг/м^3).

Для аппроксимации временной динамики использована простая статистическая модель, которая удовлетворительно описывает экспериментальные средние месячные и особенно годовые климатически значимые концентрации озона.

Авторы благодарят сотрудников Высотной метеорологической мачты ФБГУ НПО «Тайфун» за предоставление данных.

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДНЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ АТМОСФЕРЫ В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА ИОСИФА В ПЕРИОД 1935-2012 гг.

А.П. Нагурный

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, nagurny@aari.nw.ru

Предложен метод, расчета средней температуры вертикального столба атмосферы, основанный на некоторых особенностях энергетических характеристик атмосферы с использованием данных радиозондирования тропосферы Арктики. Современная база данных дополнена данными радиозондирований, выполнявшихся на Российских аэрологических станциях в 1934 – 1959 годы. В среднегодовых значениях средней температуры атмосферы отмечаются колебания с периодом несколько десятилетий и размахом 4 С^o в интервале 1935 – 2012 гг. В среднесезонных значениях средней температуры атмосферы проявляются длиннопериодные колебания одинакового характера. Зимой и в переходные сезоны они наиболее ярко выражены, а в летнее время значительно ослаблены. Изменения среднегодовых значений интегральной по высоте температуры за последние 3-5 лет были особенно интенсивны и составили падение на 2 С^o. Наблюденные колебания, свидетельствуют о существовании источников возмущения многолетнего масштаба, что характерно для эволюции аномалий температуры поверхности воды в Северной Атлантике.

.

ПЕРЕНОС И КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1» В 2011 Г. (ОБЗОР)

Б. И. Огородников[1], А. К. Калиновский[2]
[1] ГНЦ РФ «Физико-химический институт им. Л. Я. Карпова», Москва,
ogorod4@rambler.ru
[2]Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Выбросы в атмосферу радиоактивных веществ из разрушенных реакторов АЭС «Фукусима-1» начались 12 марта 2011 г. Среди них находились ^{131}I, ^{132}I, ^{132}Te, ^{134}Cs, ^{136}Cs, ^{137}Cs и другие радионуклиды. Систематические отборы проб в г. Цукуба, расположенном в 160 км на юг от Фукусимы, показали, что содержания ^{131}I, ^{134}Cs и ^{137}Cs почти два месяца превышали 1 мБк/м^3.

Длительное наблюдение за составом и концентрацией радионуклидов аварийного выброса было проведено на пункте Такасаки, входящем в систему контроля Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Пункт находится в 200 км юго-западнее Фукусимы. Здесь первое появление аварийных радионуклидов было зарегистрировано в фильтре, экспонированном 12 - 13 марта. Максимальные концентрации наблюдались, как и в Цукубе, 16 марта и были равны (Бк/м^3): ^{131}I - 15, ^{132}I - 11, ^{132}Te - 27, ^{129m}Te - 23, ^{134}Cs – 6,9 и ^{137}Cs – 5,6. После 23 марта происходил устойчивый спад объемных активностей всех радионуклидов. В сентябре, октябре, ноябре и декабре 2011 г. средние объемные активности ^{134}Cs и ^{137}Cs составляли 0,11 и 0,15 мБк/м$^{-3}$, соответственно. Постоянство содержания ^{137}Cs указывало, во-первых, на прекращение (или значительное снижение) радиоактивных выбросов из аварийных блоков АЭС «Фукусима-1», во-вторых, на то, что концентрации в воздухе ^{134}Cs и ^{137}Cs стали зависеть от вторичного пылеподъема.

На Филиппины, находящиеся в 3000 км южнее Японии, радиоактивные аэрозоли фукусимского генезиса впервые поступили через 10 дней после аварии. При этом объемные активности ^{131}I достигали 0,6-0,7 мБк/м^3, а ^{134}Cs и ^{137}Cs – 0,1 мБк/м^3. Их регистрировали до конца апреля, пока концентрации не снизились до 0,001 мБк/м^3.

Через 8-10 дней после аварии радиоактивные вещества начали поступать на территорию России. На опубликованных картах видно, что из района Фукусимы 18 марта наряду с восточным переносом северный край радиоактивного облака проходил над Камчаткой, побережьем Охотского моря и Чукоткой, а 21 марта сдвинулся на запад, захватив Якутию и Приамурье. В документах Росгидромета отмечено:

«…Впервые ^{131}I был зарегистрирован 20 марта на Дальнем Востоке в выпадениях в Южно-Курильске, затем 22 марта в аэрозолях и выпадениях в Южно-Сахалинске, 23 марта в Хабаровске, 24 марта в Благовещенске и только 26 марта во Владивостоке». В Южно-Сахалинске первые детектируемые количества ^{131}I были обнаружены в фильтре, экспонированном 22 - 23 марта. Через сутки концентрация увеличилась в 50 раз и достигла 0,75 мБк/м^3. В последующие дни объемная активность ^{131}I непрерывно снижались и к 31 марта оказались на уровне 0,01 мБк/м^3. В семи из десяти проб, отобранных в этот период, был зарегистрирован также ^{137}Cs, содержание которого составляло 0,005 – 0,013 мБк/м^3. Сроки появления ^{131}I в Южно-Сахалинске и динамика его концентрации показали, что он был принесен с воздушными массами, распространявшимися из Фукусимы на север и запад в нижней тропосфере.

Вследствие господствовавших ветров основной перенос выброшенных при аварии веществ происходил в восточном направлении. По мере распространения облака над Тихим океаном радиоактивные аэрозоли были обнаружены на Гавайских островах. Здесь в Сайпэне максимальная концентрация ^{131}I составила 28,9 мБк/м^3.

Первое поступление фукусимских аэрозолей на запад США произошло в Сиэтле (шт. Вашингтон) между 17 и 18 марта, т.е. через 7 дней после землетрясения и цунами. Затем продукты аварии были зарегистрированы еще в 12 штатах. Максимальные концентрации аэрозолей ^{131}I наблюдали 21 марта в Анахейме (шт. Калифорния) – 70,3 мБк/м^3 и 30 марта в Датч Харборе на Аляске – 103,6 мБк/м^3. В Канаде концентрации ^{131}I оказались существенно меньше. Максимальная величина 9,76 мБк/м^3 была зарегистрирована 28 марта в районе Резольют Бей. Миновав континентальную часть, облако оказалось над восточным побережьем США примерно 24 марта. Аэрозоли обнаружили в Монтгомери (шт. Алабама), Джексонвилле и Орландо (шт. Флорида).

Пройдя над Атлантикой, радиоактивный шлейф достиг Европы. Здесь первые следовые количества радионуклидов появились в Исландии через неделю после аварии.

На протяжении трех недель с помощью отбора проб аэрозолей на 150 европейских станциях мониторинга удалось охарактеризовать временное и пространственное распространение загрязненных воздушной масс. Первый пик радиоактивных веществ наблюдался между 28 и 30 марта. Второй был детектирован на 3–5 сут позже. Максимальная концентрация аэрозолей ^{131}I 8 мБк/м^3 была зарегистрирована в польском г. Лодзь 30 марта. Несколько меньшая концентрация ^{131}I 6 мБк/м^3 наблюдалась 3 апреля в белорусском г. Мстиславль.

Несмотря на высокие содержания радиоактивных аэрозолей на промплощадке ЧАЭС, сохраняющихся после аварии 1986 г., здесь также удалось идентифицировать поступление в Украину аэрозолей фукусимского генезиса. С помощью многослойных фильтров установлено, что носителями радионуклидов из Японии являются субмикронные частицы диаметром около 0,5 мкм.

Многочисленные измерения в США и Европе позволили получить данные о соотношениях ^{131}I. в аэрозольной и газообразной формах. Установлено, что на протяжении нескольких недель средняя величина соотношения газ/(газ+аэрозоль) оставалась близка к 75 %. Это коррелирует с данными, полученными после аварии на ЧАЭС.

Проведенные наблюдения показали, что после аварии в Японии зарегистрированные в США и. Европе содержания в воздухе радиоактивных веществ были низкие и не представляли опасности для здоровья населения.

СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА: ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ И ТРЕНДЫ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К МЕЗОСФЕРНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Перцев Н.Н. [1], Далин П.А. [2], Перминов В.И.[1], Ромейко В.А.[3], Dubietis[4] A., Balčiunas[4] R., Černis[5] K.

[1]Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, n.pertsev@bk.ru

[2]Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden

[3]Обсерватория Московского Дворца детского и юношеского творчества, Москва

[4]Department of Quantum Electronics, Vilnius University, Vilnius, Lithuania

[5]Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University, Vilnius, Lithuania

Анализируются данные регулярных наблюдений серебристых облаков в районе Москвы и Вильнюса за несколько десятилетий. Обсуждаются переменные, характеризующие сезонную активность серебристых облаков. Показано, что значимых трендов за анализируемый период нет. Этот результат сопоставляется с другими известными результатами по мезосферной климатической изменчивости. Далее на основе сравнения данных современной сети Северного полушария по фотосъемке серебристых облаков с данными спутникового зондирования оценивается чувствительность серебристых облаков к разнице между температурой и точкой кристаллизации воды и делаются выводы о максимально возможных изменениях температуры и влажности летней мезосферы, совместимые с нулевым трендом активности серебристых облаков. Таким образом, обсуждаются свойства сезонных характеристик серебристых

облаков как возможного индикатора климатических изменений в мезосфере.

ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ: МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАД РОССИЕЙ В СОПОСТАВЛЕНИИ С ТЕНДЕНЦИЯМИ «ПОТЕМНЕНИЯ» И «ОСВЕТЛЕНИЯ» В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ ЗЕМНОГО ШАРА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ СЕТЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Плахина И.Н.[1], Махоткина Е.Л.[2]
[1]Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, inna@ifaran.ru
[2]Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, Санкт-Петербург

Многолетние колебания прозрачности атмосферы формируются под воздействием следующих основных факторов: вулканических извержений разной интенсивности (17 вулканических извержений с начала 50-х годов до начала 80-х годов и 2 крупнейших извержения Эль Чичон в 1982 г. и Пинатубо в 1991 г.), как источников сульфатного стратосферного аэрозоля, ослабляющего солнечную радиацию, приходящую к поверхности Земли; антропогенных (промышленных) выбросов в тропосферу в развитых или развивающихся странах; естественных сезонных лесных и болотных пожаров. В работе проанализированы и оценены тренды изменений прозрачности атмосферы над территорией России в период с 70-х годов XX века по настоящее время на основе по измерений прямой солнечной радиации на 80-ти актинометрических станциях России с последующей оценкой коэффициента прозрачности P_2, фактора мутности T_2 и аэрозольной оптической толщины атмосферы АОТ. Прозрачность атмосферы $P_2 = (S / S_0)^{1/2}$, где S – прямая солнечная радиация на нормальную к лучу поверхность, приведенная к среднему расстоянию между Землей и Солнцем и к высоте Солнца 30°; S_0 – солнечная постоянная – 1.367 кВт/м^2. Фактор мутности Линке однозначно связан с P_2: $T_2 = \lg P/\lg P_i = - \lg P_2/0.043$, где P_i – прозрачность толщи идеальной атмосферы. Все расчёты проводятся при оптической массе m = 2 (высота Солнца 30°). Подробно рассмотрен период (поствулканический) с 1994 года по 2011 год, для которого проанализированы пространственно-временные вариации аэрозольных параметров над территорией России в связи с промышленным «затишьем» конца XX – начала XXI вв. и проведено сравнение с вариациями тропосферной аэрозольной компоненты в развитых странных, имеющих принятые программы очищения производств или переноса их из Европы в Азию. Рассмотре-

ны тенденции положительных и отрицательных изменений (global dimming and brightening) прозрачности атмосферы по данным WRDC, национальных метеорологических служб, данных BSRN, AERONET, представленные в соответствующих иностранных публикациях.

Некоторые выводы по полученным авторами результатам: Продолжительность периода относительно высокой прозрачности атмосферы над территорией России составляет к настоящему времени 18 лет (1994-2011). Средние годовые значения фактора мутности T_2 и аэрозольной оптической толщины АОТ для периода 1994 – 2011 гг. оказались соответственно на 10% и на 50% ниже средних годовых T_2 и АОТ для периода 1976-1995 гг. Наибольшие изменения средних годовых АОТ для указанных временных интервалов отмечаются на юге ЕТР. В годовом ходе наибольшие изменения средних месячных значений АОТ и T_2 происходят в весенне-зимний период. В период 1976-2011 гг. практически для всех регионов России характерны отрицательные тенденции изменения T_2 и АОТ. Изменения АОТ, отнесённые к 10-летнему интервалу, составили по абсолютной величине от -0.06 до +0.02. Для территории России в целом среднее уменьшение АОТ составляет - 0.02 или 14% относительно среднего АОТ для всей территории. В настоящее время отрицательные тенденции изменений АОТ сохраняются. Снижение уровня АОТ формируется под влиянием 2-х факторов: глобального очищения атмосферы от стратосферного вулканического аэрозоля (после 1994 года) и уменьшения выбросов, связанных с антропогенной деятельностью, в том числе и промышленных. Для периода 1994 -2011 гг. по данным отдельных станций на севере ЕТР, в Западной Сибири и Забайкалье выявляются слабые тенденции к увеличению АОТ. Возможные причины указанных особенностей - это региональные антропогенные (промышленные) выбросы в атмосферу, растущая пожарная (Забайкалье) активность или вулканическая активность (Камчатка), более выраженные по сравнению с другими областями РФ.

Работа выполнена по грантам РФФИ №№ 06-05-65293, 10-05-01086.

ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ СО В АТМОСФЕРЕ МОСКВЫ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Ракитин В.С., Гречко Е.И., Фокеева Е.В, Джола А.В., Горчилина А.В.
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, vadim@ifaran.ru

Представлены результаты анализа долговременных спектроскопических измерительных рядов содержания СО в Москве (пункт ИФА им. А.М. Обухова РАН) и в Звенигороде, Звенигородская научная станция

(ЗНС) в 53 км к западу от Москвы. С применением траекторного анализа и метода «скользящего среднего» получен усредненный «модельный» сезонный ход фонового содержания СО. Исследование влияния различных факторов на загрязнение атмосферы в Звенигороде показало, что эмиссии Москвы приводят к заметному (т.е. превышающему точность стандартных статистических процедур при обработке спектров) увеличению содержания СО на ЗНС достаточно редко, менее чем в 5% случаев от общего количества измерительных дней. Исключение этих случаев при вычислении городской, или «эмиссионной» части содержания позволяет использовать данные ЗНС о содержании в толще атмосферы в качестве фоновых.

Представлена систематизация дневных ходов содержания СО для Москвы. Установлена корреляционная связь загрязнения СО атмосферы Москвы со скоростью ветра в приземном слое (100-300м) и временем существования инверсии (R^2~0,4-0,8). Полученная оценка ежегодных городских эмиссий СО 2700 Тг/год подтверждается данными об эмиссиях по другим крупным городам (Мехико, Санкт-Петербург), с учетом количества автомобилей и численности населения.

Содержание СО в Москве и на ЗНС не возросло с 1970 г, несмотря на многократное увеличение количества автомобилей в регионе. Отмечено уменьшение повторяемости высоких величин, и увеличение повторяемости низких величин городской, или эмиссионной части содержания в период 2006-2012 гг.. Установлено заметное снижение (2-3% в год) содержания СО в Москве и на ЗНС в период 2001-2012 гг. Аналогичная тенденция наблюдается и при анализе аэрозольного загрязнения атмосферы Москвы.

МОДЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ВЫПАДЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА

В.Ф. Рапута, Т.В. Ярославцева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, raputa@sscc.ru

В докладе обсуждаются модели оценивания поля толщины выпадений крупнодисперсной разнородной примеси и численного восстановления распределения характерных размеров частиц пепла на различных удалениях от источника вулканического извержения в атмосферу. Для описания распределения дисперсного состава примеси в источнике по скоростям оседания используется двухпараметрическое гамма-распределение, для переноса крупных фракций частиц в направлении

ветра используется кинематическое приближение. Апробация предложенных моделей проведена на данных натурных наблюдений выпадений тефры от плинианских извержений 1853 и 1986 гг. вулкана Чикурачки (о. Парамушир, Курильские острова). Высоты эруптивных колонн достигали 13 - 14 км при скоростях ветра 35 - 40 м/с и 15 м/с соответственно.

На основе имеющихся данных полевых исследований и предложенных моделей оценивания по ограниченному числу опорных точек была проведена реконструкция следов выпадений тефры. Результаты оценивания осевых параметров, описывающих дисперсный состав частиц, оказались довольно близкими для обоих извержений. Оценки же параметров поперечного расширения заметно отличаются, что объясняется существенным различием в скоростях ветра во время извержений. Показано вполне удовлетворительное согласие между измеренными и численно восстановленными значениями толщины слоя тефры в точках отбора проб, прилегающих к осям пеплопада. Разработанные малопараметрические модели реконструкции выпадений грубодисперсной примеси дают возможность проведения вполне надёжного численного анализа данных наблюдений в пределах нескольких десятков километров от вулкана, что продиктовано использованием кинематического приближения.

ВАЛИДАЦИЯ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ CO В ТИПИЧНЫХ И АНОМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ОЦЕНКА ЭМИССИЙ ОТ ПОЖАРОВ И ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

А.Н. Сафронов, Ракитин В.С., А.В. Джола, Л.Н. Юрганов (США)
Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва, safronov_2003@mail.ru
JCET Research Group: UMBC, MD, USA

Результаты проведенной валидации наземных (спектрометры среднего разрешения ~0,2 см-1) и спутниковых (сенсоры MOPITT, AIRS и IASI) измерений содержания CO свидетельствуют о хорошем согласии данных в фоновых условиях или условиях невысоких загрязнений. При интенсивных эмиссиях с поверхности разница между наземными и спутниковыми данными может достигать 2-3 раз вследствие низкой чувствительности орбитальных спектрометров к нижнему слою атмосферы (0-3 км от поверхности).

По результатам этой валидации спутниковые данные о содержании были исправлены с учетом наземных данных и с применением балансо-

вой модели получена оценка эмиссий CO от пожаров в Европейской России летом 2010 г. (36-42 Тг). Эта оценка хорошо согласуется с оценками (25-36 Тг), полученными по методике Active Fires для этого же эпизода. Отмечается, что предварительные оценки, полученные для этого эпизода разными авторами с применением различных методик («Active Fires», продукт MODIS - MCD14ML и «Burned Areas», продукт MODIS - MCD45) и баз данных об эмиссиях GFED, GFAS и др., отличались как от наших, так и между собой до порядка величины. С применением доступных инвентаризационных методик, карт растительности и баз данных, было установлено, что неопределенности при оценке эмиссий от пожаров вызваны, в порядке значимости: различиями в методиках подсчета эмиссий; различиями в используемых картах растительности; различиями в данных MODIS о количестве и локализации пожаров спутников Terra и Aqua; неучетом динамики изменения структуры растительности. Отмечено, что наиболее адаптированными к условиям Европейской части России оказались карты растительности GlobCover-2009.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ НА КИСЛОВОДСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ ИФА ИМ. А.М. ОБУХОВА РАН (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ, КАВКАЗСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ, РОССИЯ)

И.А.Сеник[1] , чл.-кор. РАН Н.Ф.Еланский[1], М.С.Артамонова[1], А.Я.Арабов[1], А.Н. Боровский[1], А.С.Елохов[1], А.С.Емиленко[1], А.Исаков[1], В.В.Савиных[1], Ю.В. Жуланов[2] Н.П.Поволоцкая[3]

[1]Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Кисловодск, Москва, senik_ia@list.ru

[2]Физико - химический Институт им. Карпова, Россия, Москва;

[3]ПГНИИ Курортологии ФМБА», Россия, Кисловодск

С 70-ых годов прошлого столетия на высокогорной площадке ГАС ГАО (Северного Кавказа) были проведены первые фотометрические исследования ИФА. Прозрачность атмосферы, большое число малооблачных дней вызвали интерес, и уже в экспедиционном режиме на плато в горах развернулось изучение атмосферных процессов. Фоновое состояние атмосферы на плато ШЖМ предоставило возможности исследовать на этом естественном полигоне тонкие природные процессы, в том числе, роль динамических и химических процессов в горных районах, а также испытывать измерительную аппаратуру и отрабатывать

методики измерений. Под руководством А.М.Обухова, директора ИФА РАН, и согласно его дальновидным замыслам, стараниями многих сотрудников ИФА были развернуты исследования параметров ионосферы, озона, NO2, CO, H2O, орографических возмущений. В круг интересов Александра Михайловича, человека государственного и почувствовавшего хрупкость горных экосистем, вошли исследования состояния воздушного бассейна известного в стране курорта Кавказские Минеральные Воды. Актуальность начатых работ подтвердило время. Станция КВНС (43.7^{o} с.ш. 42.7^{o} в.д. 2070м над у.м.) единственная в большом регионе имеет продолжительные ряды ключевых параметров атмосферы, так необходимые в современную эпоху перемен, для климатических и экологических исследований: общее содержание, профиль и ПКО, УФ излучение, общее содержание в столбе NO2, CO, H2O, характеристики приземного аэрозоля, приземные CO,NO2. Измерения сопровождаются видео наблюдениями облачной обстановки (для отслеживания орографических ситуаций и ситуаций подъема границы ППС на уровень станции). Для контроля возможных выносов загрязнений с нижних уровней атмосферы со стороны населенной равнины КМВ в г. Кисловодске с 1998 г проводятся дублирующие измерения КГС (43.9^{o} с.ш. 42.7^{o} в.д. 890 м. над уровнем моря). На станциях работают автоматические метеостанции. Эти измерения позволяют контролировать процессы местного и регионального загрязнения, изучать дальний перенос примесей.

Результаты. В 1981г Лабораторией верхней атмосферы получены новые представления о свойствах процессов генерации ВГВ в нижней атмосфере и о пространственных масштабах возмущений температуры в подветренной области мезопаузы.

Обнаружены (Еланский, Сеник, Хргиан, 1988) с помощью наземных наблюдений на КВНС к**оротко**периодические колебания в ОСО и **ПКО,** они отождествлены **с волновыми процессами орографического и метеорологического происхождения**.

Независимость средних значений и характера поведения малых примесей на двух уровнях наблюдений (КВНС и КГС) доказана на масштабах межгодовой, сезонной и внутрисуточной изменчивости в 85% времени наблюдений, что может свидетельствовать: **воздухообмен в направлении КВНС -Кисловодск не происходит в** это время [Senik and, 2005].

Проанализирован **суточный ход приземного озона на КВНС и КГС.** Выделен важный специфический фактор формирования приземных полей примесей в горных районах, связанный с синоптической ситуацией**: фен (Feohn). На КВНС** в условиях действия фена регистрируются увеличения приземной концентрации озона **до 15-25ppb.Оценена возможность влияния фёна на тренд.**

Сезонный ход ПКО на КВНС бимодальный (локальные максимумы весной (Mar-Apr, seldom May) и поздним летом (Jul-Aug). Анализ **локальных фазовых особенностей (экстремумов)** выявил **вариации положения локальных максимумов сезонного цикла** на временной оси относительно друг друга **с периодами, характерными для QBO [Senik and,2004].**

Данные ПКО использовались (для валидации) в работе SECOND "TROPOSPHERIC OZONE" WORKSHOP «Tropospheric ozone changes: Observations, state of understanding, and model performances», Toulouse, apr.2011, в рамках которой обсуждались проблемы **сопоставления данных наземных и дистанционных**, спутниковых, зондов и самолетных наблюдений тропосферного озона в разных регионах мира, причины разнообразия режимов поведения озона, ввиду существующих различий, противоречий и их достоверность. Сопоставлялись **тренды тропосферного (на разных уровнях) озона, сосчитанные по общей методике**. Тренд приземного озона на КВНС (deseasonolyzed) отрицательный -0.41 ($2\sigma\pm0.08$; R^2 31.8%, t=-10.5) для двух стандартных декад 1990-2009 (ночные значения), однако для последней 1999-2009 он незначимый (ряд выравнивается). Выявлен участок ряда с максимальным трендом на КВНС 01.1991-10.1996: -1.6±0.22 ppb/yr .

В ОСО в районе КВНС с начала 80-х до середины 90-х тоже зарегистрирован максимальный по модулю отрицательный тренд 1981-1993: -3.55±0.5 DU/yr (2σ).

Выявлены динамические особенности региона, которые, возможно, влияют на **сезонный ход и межгодовую изменчивость общего содержания озона** (ОСО).

В процессе анализа данных, представленных Россией (Томск, Монды, Кисловодск), выявлены элементы **согласованности межгодовой изменчивости озона, и общие закономерности сезонного хода**, подтверждающие существование единой логики в тропосфере в районе **Томска и на высокогорье (Северный Кавказ, КВНС)**, не смотря на удаленность.

Обработан уникальный ряд общего содержания **NO_2, выявлены основные характеристики изменчивости** (разница вечерних и утренних измерений, влияние вулканов и крупномасштабной циркуляции).

Проведен спектральный анализ, в т.ч., локальный спектральный анализ (Wavelet и Cross-Wavelet) изменчивости рядов NO2, приземного озона и ОСО, субмикронного аэрозоля, индекса горно-долинной циркуляции и метеопараметров. Все ряды параметров продемонстрировали, что быстрые изменения значения параметра или скорости его изменения (изменение тренда) в «особых точках» связаны с изменением с это-

го момента и частотного режима вариаций параметра. Все ряды в той или иной степени и, порой, согласованно меняли режимы вариаций. Смены режимов связаны, видимо, с комбинированным **влиянием различных динамических факторов (El-Nino), (NAO), QBO,** что приводит к перестройкам спектров режимов и ветра, и состава атмосферы.

С помощью локального спектрального анализа рядов приземного озона и индексов глобальной циркуляции NAO и SOI обнаружены признаки модуляции поведения озона на JFJ и КВНС крупномасштабными циркуляционными процессами.

Проведено сопоставление уровней и закономерностей поведения, в том числе, трендов **озона на КВНС и аэрозольного загрязнения в Кисловодске** с данными на нескольких станциях, расположенных в **курортных районах Грузии** (Институт Геофизики им. М.Нодия, Тбилиси). Выявлена согласованность межгодовой изменчивости, тренда и интересные особенности. Результаты будут освещены в докладе

На КВНС в 2012 проводились отработка методик валидации космических спутников, а наше оборудование обеспечивало подспутниковые измерения дистанционного зондирования Земли космическими комплексами.

В условиях климатических изменений и стремительного развития индустрии туризма необходим и проводился контроль экологической ситуации и её изучение, чтобы оценивать возможные сценарии развития. Такой подход необходим для решения важных задач: обеспечение безопасности населения, в том числе на курортах, безопасность курортного лечения природными факторами; повышение эффективности лечебных и оздоровительных мероприятий (уберечь от метеопатических реакций); методическое обеспечение, поддержка и контроль устойчивости развития экономики рекреационных природозависимых регионов. Методические пособия (рецензируемые) по безопасному использованию природных лечебных факторов (уф, аэроионофитотерапия, лечебная ходьба по терренкуру) – обязательный ежегодный продукт наших совместных с «ПГНИИ Курортологии ФМБА», исследований на КМВ.

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЫМОВОГО АЭРОЗОЛЯ НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ В ПЕРИОД ПОЖАРОВ ЛЕТОМ 2010 г.

Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Горчакова И.А., Карпов А.В., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, ssitnov@mail.ru

Обширный и продолжительный блокирующий антициклон, установившийся на европейской территории России (ЕТР) летом 2010 г. способствовал аномальному повышению температуры, длительному отсутствию осадков и возникновению массовых лесных и торфяных пожаров, приведших к многодневному задымлению атмосферы региона. Данные аэрокосмического мониторинга позволяют изучить как локальные характеристики дымового аэрозоля, так и эволюцию задымления на всей охваченной пожарами территории, что необходимо для корректной оценки климатических, экологических и медицинских (в том числе отложенных) последствий воздействия продуктов горения.

В данной работе на основе спутниковых наблюдений исследуется пространственно-временная эволюция аэрозольной оптической толщи (АОТ, λ=0.55 мкм) и коротковолнового радиационного форсинга дымового аэрозоля над ЕТР летом 2010 года. Использовались наблюдения АОТ спутниковым прибором MODIS (http://ladsweb.nascom.nasa.gov). К анализу привлекались также данные детектирования прибором MODIS очагов действующих пожаров (http://firefly.geog.umd.edu) и данные ветрового аэрологического зондирования (http://weather.uwyo/uppeair). Под ЕТР понимается территория, ограниченная координатами 47°-65° N и 25°-55° E, площадью около 3.6 млн км^2.

Летом 2010 г. пожары на ЕТР отмечались практически повсеместно, однако анализ данных детектирования очагов горения позволяет выделить пять кластеров пожаров, характеризовавшихся сходной временной динамикой: Южный Урал, Северный Урал, центр ЕТР, юг ЕТР и Северное Причерноморье [1]. Наибольшая плотность пожаров отмечалась в период с 23 июля по 16 августа в центре ЕТР - в области, ограниченной координатами 54°-57° N и 38°-48° E. На этой территории, площадь которой составляет 6% площади ЕТР, количество пожаров превышало 60% общего количества очагов горения, отмечавшихся на ЕТР в этот период. Особенностью ситуации конца июля - первой половины августа является то обстоятельство, что центр антициклона (на уровне 500 гПа) в этот период мигрировал вблизи кластера наиболее интенсивных пожаров в центре ЕТР.

Выявляемая по спутниковым данным пространственно-временная динамика дымового загрязнения летом 2010 г. зависит от временного осреднения (дискретизации) данных. При подекадном осреднении (10-11 дней) отмечается медленное смещение области задымления с севера на юг ЕТР [1]. При осреднении данных на ежедневной основе обнаруживаются принципиально новые детали эволюции поля АОТ. Формирование над ЕТР области замкнутой антициклонической циркуляции (связанной с усилением ветра на границах ЕТР и его ослаблением в центре ЕТР) сопровождалось формированием локализованной области максимального задымления - дымового пятна [2]. В период развитой антициклонической циркуляции в конце первой декады августа пространственная картина АОТ обнаруживала отчетливые признаки вращения [2-4]. 5-9 августа область экстремально высоких значений АОТ (≥3), оставаясь на расстоянии 200-650 км от Москвы, совершила полный антициклонический оборот вокруг мегаполиса. Столице, таким образом, удалось избежать экстремального задымления. При миграции дымового пятна на территорию мегаполиса среднедневные значения АОТ над Москвой могли быть в 1.5-3 раза выше величин АОТ, отмечавшихся над городом в этот период.

С использованием аналитических аппроксимаций зависимостей коротковолнового аэрозольного радиационного форсинга (АРФ) от АОТ [5,6] были сделаны оценки величин среднего регионального радиационного форсинга дымового аэрозоля на верхней и нижней границах атмосферы. Присутствие в воздухе дымового аэрозоля приводило к заметному охлаждению приповерхностного слоя атмосферы и нагреву толщи атмосферного воздуха над обширной территорией. Результаты расчетов показали, что в период 5-9 августа величины среднего регионального АРФ на верхней (нижней) границе атмосферы варьировали в пределах от -66 до -58 (от -117 до -102) Вт/м^2, достигнув максимума 9 августа [2]. Анализ распределения величин АРФ по территории региона в период пожаров выявил их существенную пространственную неоднородность. Максимальные величины локального мгновенного радиационного форсинга дымового аэрозоля отмечались в центре ЕТР и достигали в первой декаде августа значений -151 (-385) Вт/м^2 на верхней (нижней) границе атмосферы. На периферии ЕТР величины АРФ были в 5-7 раз меньше. Крупномасштабные пространственные неоднородности радиационного форсинга дымового аэрозоля должны были способствовать образованию соответствующих температурных неоднородностей, в свою очередь, способствовавших усилению степени бароклинности атмосферы и возникновению термического ветра. Индуцируемые таким образом воздушные потоки (имеющие размеры сопоставимые с

масштабом самого барического образования) могли взаимодействовать с антициклонической циркуляцией, усиливая или ослабляя ее [2,4].

Были рассчитаны статистические характеристики вариаций АОТ и эмпирические функции распределений величин АОТ, наблюдавшихся в период массовых пожаров над ЕТР [2,3]. Полученные результаты показывают, что в период с 23 июля по 16 августа среднее значение АОТ по региону менялось от 0.21 до 1.16. В период интенсивного задымления с 5 по 9 августа доля территории с повышенным уровнем задымления (АОТ>1.5) варьировала в пределах 21-28 % от площади ЕТР.

С привлечением результатов наземных исследований оптических и микрофизических характеристик дымов и однопараметрической модели субмикронного аэрозоля [7] были сделаны оценки дымовой массы. В дни максимального задымления среднесуточная масса субмикронного дымового аэрозоля над ЕТР достигала 1.25 Мт (9 августа 2010 г.) [2,3].

Была исследована связь диагностируемого прибором MODIS количества действующих пожаров (КДП) со скоростью и направлением ветра в тропосфере. Показано, что в период массовых пожаров в центре ЕТР КДП положительно коррелировало с южным и восточным ветром и отрицательно - с северным и западным ветром. Коэффициент корреляции КДП с меридиональным ветром достигал величины 0.67 на высоте 0.8 км.

Экстремальное задымление ЕТР предоставило уникальную возможность для калибровки спутниковых наблюдений АОТ по эталонным наземным наблюдениям. В условиях более чем 20-кратного изменения величин локального аэрозольного загрязнения воздуха проведена валидация данных АОТ спутниковых приборов MODIS данными АОТ солнечного фотометра CIMEL станции Звенигород сети AERONET. Результаты сопоставления показали согласие спутниковых и наземных наблюдений АОТ [2,4].

1. Ситнов С.А. // Изв. РАН. ФАО. 2011. Т. 47. № 6. С. 774-789.
2. Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Горчакова И.А., Карпов А.В., Колесникова А.Б. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1062-1076.
3. Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Карпов А.В. // ДАН. 2012. Т. 446. № 5. С. 561-567.
4. Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Карпов А.В. // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. (в печати)
5. Chubarova N., Nezval' Y., Sviridenkov M., et al. Smirnov A. // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 557-568.
6. Горчакова И.А., Мохов И.И. // Изв. РАН. ФАО. 2012. Т. 48. № 5. С. 558-565.
7. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. // Изв. АН. ФАО. 1981. Т. 17. № 1. С. 39-49.

СОДЕРЖАНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ В УСЛОВИЯХ БЛОКИРУЮЩЕГО АНТИЦИКЛОНА ЛЕТОМ 2010 ГОДА

С.А. Ситнов, И.И. Мохов
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, ssitnov@mail.ru

Водяной пар (ВП) является одним из ключевых элементов земной климатической системы. Данные наземных систем наблюдений недостаточно полно характеризуют сложные пространственно-временные изменения ВП над европейской территорией России (ЕТР) в условиях атмосферного блокирования зонального переноса летом 2010 г., формирования аномального температурного и гидрологического режимов территории и, как следствие, развития на ЕТР массовых пожаров. ВП является одним из продуктов, выделяющимся при горении биомассы.

В настоящей работе с привлечением спутниковых наблюдений общего влагосодержания (ОВ) приборами MODIS (платформы Aqua и Terra), данных детектирования активных пожаров, сетевого аэрологического зондирования и NCEP/NCAR реанализа проводится анализ пространственно-временной изменчивости содержания ВП над ЕТР в июле-августе 2010 г.

Максимальная плотность пожаров отмечалась в центре ЕТР с 23 июля по 16 августа. Этот период характеризовался аномальным пространственным распределением ОВ. В отличие от характерного для ЕТР уменьшения ОВ в тропосфере с широтой, во время массовых пожарах на севере региона отмечался избыток влагосодержания, а на юге - его дефицит. Экстремальные величины аномалий ОВ по данным MODIS достигали величин 1.5 см на севере ЕТР и -1.6 см на юге ЕТР (71% и -45% от соответствующих климатологических величин влагосодержания). Аномальное распределение ВП в атмосфере было связано с особенностями режимов испарения и адвективного переноса ВП над ЕТР системой ветров блокирующего антициклона при дополнительном притоке ВП в процессе горения биомассы. Усиление и ослабление антициклонической циркуляции сопровождалось соответственно усилением и ослаблением адвекции ВП на север ЕТР вдоль западной и северной периферии блокирующего антициклона, что приводило к увеличению и уменьшению среднего регионального влагосодержания. Анализ данных аэрологического зондирования показал, что существенную роль в формировании пространственных аномалий ОВ играл перенос ВП выше погранслоя - в слое 2-5 км. В стратосфере над ЕТР в период пожаров в целом отмечалось уменьшение ВП - меньше на севере, больше на юге.

В последнюю декаду июля дефицит ВП в стратосфере над югом ЕТР по данным радиозондирования составлял 50%.

Похожими с описанными выше особенностями характеризовалось распределение ВП над ЕТР в условиях блокирующего антициклона и летних пожаров 1972 года. Наряду со сходными чертами динамики ВП во время летних блокирований 2010 г. и 1972 г. отмечены существенные различия. Среднее влагосодержание в пограничном слое атмосферы в 2010 г. существенно превышало влагосодержание в 1972 г. Максимальные различия отмечались в приземном слое атмосферы и достигали 1.2 г/кг (13%). При этом в 2010 г. во всех анализировавшихся слоях в атмосфере отмечены положительные аномалии содержания ВП (относительно соответствующих средних за предшествующий десятилетний период), тогда как в 1972 г. знак аномалий менялся с высотой - в пределах пограничного слоя атмосферы отмечался дефицит влагосодержания, а выше (как и в 2010 г.) - его избыток.

1. Ситнов С.А., Мохов И.И. // ДАН. 2013. Т. 448. № 2. С. 206-212.
2. Ситнов С.А., Мохов И.И. // Изв. РАН. ФАО. 2013. Т. 49. № 4. (в печати).
3. Горчакова И.А., Мохов И.И. // Изв. РАН. ФАО. 2012. Т. 48. № 5. С. 558-565.

ГАЗОВЫЕ ПРИМЕСИ АТМОСФЕРЫ В ФОНОВЫХ И ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Лаврова О.В., Моисеенко К.Б., Васильева А.В., Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Сафронов А.Н., Сеник И.А.
ИФА Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва,
skorokhod@ifaran.ru

Атмосферная химия в условиях сильного загрязнения имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с удаленными (незагрязненными) регионами. Под незагрязненными или фоновыми условиями подразумевается отсутствие явного воздействия антропогенной деятельности на состав приземного воздуха в данной местности в данный момент времени. Перманентно фоновых условий практически не существует, и в самых удаленных уголках планеты находят следы атмосферного загрязнения, принесенного от различных источников посредством динамических процессов.

Тем не менее, на практике достаточно ясно видны места, находящиеся в устойчиво загрязненных условиях. Они находятся либо в непосредственной близи от источников загрязнения (город, промышленные

предприятия, места добычи и транспортировки полезных ископаемых и т.д.), либо на пути регулярного распространения поллютантов (например, по направлению западного переноса).

В настоящей работе представлены результаты многолетних прямых измерений газового состава атмосферы (O3, NOx, SO2, CO, NH3, углеводородов, CO2, CH4) в загрязненных и чистых (фоновых) условиях, проведенных сотрудниками ИФА на станциях в Москве, Кисловодске, Зотино (Центральная Сибирь), а также в ходе трансконтинентальных экспедиций TROICA.

Представлены результаты наблюдений газового состава атмосферы (O3, NOx, SO2, CO, NH3, углеводородов, CO2, CH4) в загрязненных и чистых (фоновых) условиях. По данным прямых измерений методом протонной масс-спектрометрии (PTR-MS), который впервые в России был освоен и применен для определения концентрации летучих органических соединений в приземном атмосферном воздухе, проведен анализ состояния атмосферного воздуха над территорией России. По данным мониторинга состава атмосферы в Московском мегаполисе и других городах России исследованы химические взаимодействия NO, NO2, O3 и летучих органических соединений (ЛОС), играющие важнейшую роль в формировании атмосферного загрязнения города. Выявлены зависимости генерации O3 от соотношений NOx и ЛОС, времени суток, сезона.

В отсутствие явных антропогенных источников суточный ход NO, NO2, CO, SO2, антропогенных ЛОС представляет собой практически плоскую линию. В городах распределение становится более сложным с отчетливо выраженными утренним и вечерним максимумами, соответствующими часам пик и (особенно утром) усиленные температурной инверсией.

Для примесей, имеющих как биогенное, так и антропогенное происхождение, к которым относятся парниковые газы CO2 и CH4, а также биогенных ЛОС (изопрен, монотерпены и др.), отчетливый суточный ход характерен, напротив, в фоновых условиях в вегетационный период, когда активны процессы растительного метаболизма, почвообразования и т.д. В холодное время он практически неразличим. В загрязненных условиях суточный ход нарушается воздействием антропогенных источников (особенно в случаях с CO2), однако общие его черты сохраняются.

Приземная концентрация озона определяется с одной стороны, интенсивностью его фотохимической генерации в дневное время (летом этот процесс происходит наиболее сильно), с другой – скоростью разрушения при взаимодействии с другими компонентами атмосферного

воздуха. Большое значение могут играть и динамические факторы – стратосферно-тропосферный обмен и адвекция. Существует два режима фотохимической генерации озона: чувствительный к концентрации NOx и чувствительный к концентрации ЛОС (или насыщенный NOx). При низком содержании оксидов азота скорость генерации возрастает с ростом концентрации NOx. При высокой концентрации NOx концентрация озона будет понижаться при росте содержания NOx. Как правило, вблизи промышленных объектов преобладают высокие концентрации NOx, которые и определяют содержание озона в приземном воздухе. Анализ данных наблюдений показывает, что высоких значений (порядка 100 ppb) концентрация озона может достигать как в чистых, так и загрязненных условиях. Максимальных концентраций (150 ppb и выше) озон может достигать при фотохимической генерации с участием продуктов горения биомассы (природные пожары). В отдельных случаях в экстремальной генерации озона в относительно чистых условиях велика роль дальнего переноса летучей органики.

По данным измерений CO и NO2 на фоновой станции в Зотино (Центральная Сибирь) и численного моделирования на основе модельного комплекса RAMS/CAMx проанализирован вклад антропогенных шлейфов и природных пожаров в наблюдаемые приземные концентрации. Если возмущения CO в антропогенных шлейфах были на уровне 1.5-2 ppb, то аналогичные превышения в шлейфах от пожаров были на порядок выше.

При помощи методики оценки качества воздуха, разработанной в ИФА, проведен анализ загрязнения российских городов по данным эксперимента TROICA и наблюдениям в Москве. В целом оно является умеренным. Основной вклад в загрязнение атмосферы из исследованых примесей вносит диоксид азота, т.к. его источником являются выхлопные выбросы автомобилей. Высокие значения индекса загрязнения, обусловленные высокими концентрациями CO, O_3, SO_2, НМУВ (неметановые углеводороды), редки, и как правило, связаны с чрезвычайными ситуациями: лесными пожарами для CO и O_3, использованием резервных видов топлива при продолжительных морозах для SO_2. Повышение содержания в атмосфере суммы неметановых соединений обычно обусловлено локальными, непродолжительными выбросами.

1. Н.Ф.Еланский, И.Б. Беликов, Е.В. Березина, и др. *Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA*//МНТЦ, Издательство «Агроспас». 2009, 81 с.
2. N.F. Elansky, I.B. Belikov, O.V. Lavrova, A.I. Skorokhod, R.A. Shumsky, C.A.M. Brenninkmeijer and O.A. Tarasova. Chapter 8. *Train-Based Platform for Observa-*

tions of the Atmosphere Composition (TROICA Project) P. 175-196 // In "Air Pollution-Monitoring, Modelling and Health". Ed. Mukesh Khare ISBN: 978-953-51-0424-7, Publisher: In Tech. 386 p, 2012. DOI 10.5772/1801.

3. A. Skorokhod, N. Elansky, N. Pankratova, O. Lavrova. *Urban pollution in Russia and its assessment*. 8th International Conference on Air Quality - Science and Application. 19-23 March 2012, Athens, Greece. Short papers, 2012, AQC2012-SkorA00579, pp. 729-732.
4. Vasileva A.V., Moiseenko K.B., Mayer J.-C., Jurgens N., Panov A., Heimann M., Andreae M.O. *Assessment of the regional atmospheric impact of wildfire emissions based on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia* // J.Geophys. Res. 2011. 116. D07301. doi:10.1029/2010JD014571.

ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА НА СУТОЧНЫЙ ХОД НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ

С.Э. Смирнов[1], Г.А. Михайлова[2], О.В. Капустина[2]

[1]Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка (Камчатский край), sergey@ikir.ru

[2] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.Н.В. Пушкова РАН, Троицк (Московская обл.)

Исследован суточный ход напряженности электрического поля в приземной атмосфере в условиях хорошей погоды. Показано, что максимум суточного хода электрического поля на среднеширотной обс. «Паратунка» связан с утренней конвекцией воздуха в приземном слое. В качестве меры конвективного потока воздуха были выбраны разность температур среды у поверхности земли и на высоте 25 м. Показана высокая корреляция значений разности температур на этих высотах и суточным ходом напряженности электрического поля.

Использовано выборочно 29 записей в условиях «хорошей погоды». Показано, что оцененные параметры эффекта: времена его начала и достижения максимума величины градиента потенциала относительно времени восхода, а также отношение максимума к величине до восхода и длительность эффекта, близко согласуются с ранее опубликованными в литературе данными. Тем самым подтвержден вывод о том, что эффект восхода в суточных вариациях градиента потенциала электрического поля в приземной атмосфере обусловлен процессами турбулентности и конвекции в приземной атмосфере при изменении температуры атмосферы.

Исследованы спектры мощности временных вариаций градиента потенциала электрического поля в приземной атмосфере и горизонталь-

ной компоненты геомагнитного поля. Рассмотрены периоды суток, включающие в себя восход и заход Солнца, а также ночное время. Показано, что в течение суток в спектрах мощности этих параметров присутствуют колебания с периодами T ~2,0-2,5 ч. На восходе Солнца в спектрах мощности градиента потенциала интенсивность этих колебаний заметно возрастает, и одновременно усиливаются колебания в полосе периодов T < 1 ч. Вариации аргумента взаимных спектров этих параметров показали, что колебания в полосе периодов 2,0-2,5 ч вызваны удаленными источниками выше динамо-области ионосферы, а колебания в полосе периодов 0,5-1 ч – источниками в нижней атмосфере. Предложен возможный механизм генерации этих колебаний, связанный с вихревым движением конвективных ячеек, зарождающихся на восходе Солнца в обменном слое атмосферы.

РЕАКЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ

С.Э. Смирнов[1], Г.А. Михайлова[2], О.В. Капустина[2]

[1]Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка (Камчатский край), sergey@ikir.ru

[2] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк (Московская обл.)

Исследованы суточные вариации электропроводности, напряженности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере во время солнечных событий в период 21-31 октября 2003 г. Показано, что электропроводность и напряженность электрического поля проявляют сильную зависимость от температуры и влажности воздуха. Обнаружено увеличение электропроводности в течение двух дней накануне геомагнитной бури 29-30 октября в результате действия СКЛ и уменьшение ее во время Форбуш-понижения ГКЛ с соответствующим ростом напряженности электрического поля. Обнаружено аномальное повышение температуры и влажности воздуха в процессе развития солнечной активности, что привело к образованию облаков различных форм, включая кучево-дождевых, сопровождаемых грозовыми процессами и ливнями. Совпадение по времени нарушения регулярных метеорологических процессов с последовательностью солнечных вспышек, сопровождаемых усилением излучения в полосе ближнего ультрафиолета, видимой и инфракрасной частей спектра, позволяет

рассматривать их в качестве источника дополнительного притока энергии в нижнюю атмосферу.

Исследованы эффекты геомагнитных бурь 8 и 10 ноября 2004 г. в вариациях напряженности и спектров мощности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке в комплексе с одновременно наблюдаемыми метеорологическими и геофизическими явлениями. Показано, что последовательность сильных солнечных вспышек вызвала аномальное повышение температуры и влажности воздуха. Это привело к возбуждению аномально сильных грозовых процессов в атмосфере во время бури 8 ноября и не позволило на этом фоне выделить эффекты, связанные с космическими лучами. Во время бури 10 ноября на фоне слабых вариаций метеорологических величин обнаружено возрастание напряженности и интенсивности спектров мощности электрического поля накануне бури 10 ноября с последующим ослаблением этих величин в день бури. Предположено, что эти эффекты связаны с действием космических лучей на токи глобальной электрической цепи. Показано, что в спектре мощности электрического поля влияние Форбуш- эффекта ГКЛ проявляется также в усилении компоненты с периодом T~48 ч, а в вариациях влажности - в усилении компоненты с T ~ 24 ч. Показано отсутствие причинно-следственных связей между вариациями напряженности электрического поля и горизонтальной компонентой геомагнитного поля как в условиях «хорошей погоды», так и во время бури 10 ноября. Обнаружен отрицательный суточный перепад атмосферного давления на второй день после геомагнитных бурь 8 и 10 ноября.

Исследован эффект геомагнитной бури 5 апреля 2010 г. в электрических параметрах приземного слоя воздуха на Камчатке. Показано проявление трех процессов в развитии этой бури. Падение электропроводности воздуха связано с уменьшением потока галактических космических лучей, одним из основных ионизаторов воздуха. Внезапное начало бури вызвало индукционные эффекты в электрических полях. На последующих стадиях бури появился значительный избыток положительно заряженных частиц в приземном воздухе.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОДИНАМИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ COSMO-RU7ART

Г.В.Суркова, А.А.Кирсанов, А.В.Кислов, А.П.Ревокатова, Г.С.Ривин
Гидрометцентр России, МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, galina_surkova@mail.ru

1. Система COSMO-Ru7ART является интегрированной on-line системой [Baklanov, 2011] и включает в себя мезомасштабную

негидростатическую модель атмосферы COSMO-Ru7 (COnsortium for Small-scale MOdelling - RUssia) [Вильфанд и др., 2010] и модель атмосферной химии ART (Aerosols and Reactive Trace gases) [Vogel и др., 2011]. Благодаря этому на каждом шаге по времени расчет метеорологических величин и химических преобразований выполняется совместно, что позволяет учитывать обратное влияние аэрозолей и газов на атмосферные процессы. В COSMO-Ru7ART учитываются химические процессы в газовой фазе, фотодиссоциация, коагуляция, конденсация, нуклеация, осаждение, выведение и вымывание аэрозолей. Предусмотрен учет аэрозольной химии, взаимодействия аэрозолей с радиацией, эмиссия морской соли, минеральной пыли, пыльцы, биогенные выбросы гидрокарбонатов и гетерогенные реакции, используются данные об антропогенных эмиссиях, рассчитанные по методике TNO (Нидерланды, Netherlands Organization for Applied Scientific Research) [Kuenen и др., 2011] и о типе землепользования проекта Global Land Cover 2000 Project. В настоящее время COSMO-Ru7ART реализована в Гидрометцентре России на вычислительном комплексе SGI Altix 4700 для территории Центрального Федерального округа (ЦФО) с шагом по пространству 7 км, по времени 40 с и 40 уровнями по вертикали.

2. Оперативный прогноз концентрации загрязняющих веществ. Объем антропогенных выбросов не измеряется напрямую, инвентаризация эмиссий загрязняющих веществ проводится косвенными методами со значительным (иногда более года) запаздыванием по времени. Это является причиной постоянного поиска методов уточнения эмиссий, используемых при оперативном расчете прогноза загрязнения атмосферы. Особую актуальность разработка такого метода имеет для атмосферы крупных городов, особенно сильно подверженной влиянию антропогенных выбросов, изменчивость которых велика во времени и пространстве. Предлагается оперативный метод расчета эмиссий угарного газа, основанный на данных измерения его концентрации. Рассчитанные предложенным способом эмиссии могут быть использованы в качестве входных данных для химико-транспортнх моделей. При сравнении результатов численных экспериментов с данными наблюдений сети Мосэкомониторинг было выявлено, что прогноз концентрации CO с использованием эмиссий, рассчитанных предложенным методом, в большинстве случаев, показал большую согласованность с данными наблюдений, чем прогноз с использованием данных TNO.

***3.* Выброс в атмосферу загрязняющих веществ во время лесных пожарах.** Для случаев пожаров в ЦФО в августе 2010 г. применена

методика расчета выброса в атмосферу загрязняющих веществ во время лесных пожарах, предназначенная для корректировки входных данных при моделировании распространения атмосферных примесей. Методика основана на прямом учете типа растительности и ее средней биомассы. Это позволяет оценить соответствующий фактор эмиссии, при заданных площади пожара и его продолжительности моделировать распространение шлейфа пожара и производить учет физической и химической трансформации примесей в атмосфере. В пользу этого метода говорит возможность оперативного его применения, так как дополнительная коррекция входных данных о локализации очагов горения и выборе типа растительности при проведении численных экспериментов не требует длительного времени. Проверка полученных результатов свидетельствует о перспективности использования данного метода.

4. В дальнейшем предполагается продолжить работу [Ревокатова и др., 2012, 2013] по совершенствованию прогноза в двух основных направлениях: оперативное уточнение антропогенной эмиссии газов по данным мониторинга концентраций этих газов в воздух и оперативный прогноз распространения шлейфов воздушных загрязнений от различных очагов (лесных пожаров, выбросов пыльцы, вулканов, техногенных выбросов) с учетом свойств подстилающей поверхности и спутниковых данных.

1.Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А. *Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития* // Метеорология и Гидрология, 2010, № 8.

2.Ревокатова А.П., Суркова Г.В., Кирсанов А.А., Ривин Г.С. *Прогноз загрязнения атмосферы Московского региона с помощью модели COSMO-ART* // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География, 2012. № 4.

3.Ревокатова А.П., Суркова Г.В., Кислов А.В. *Расчет эмиссий в атмосферу загрязняющих веществ на примере Москвы и Московской области* // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География, 2013. № 1.

4.Baklanov A. *Introduction - Integrated systems: On-line and Off-line Coupling of Meteorological and Air Quality Models, Advantages and Disadvantages* // In book: Baklanov A., Mahura, A., Sokhi R. (eds.). Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models. Springer, 2011. P. 1-12.

5.Kuenen, J., Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van der Brugh, H.*: High resolution European emission inventory for the years 2003–2007*, TNO-report TNO-060-UT-2011-00588, 2011.

6. Vogel B., H. Vogel, D. Baumner, M. Bangert, K. Lundgren, R. Rinke, T. Stanelle. COSMO-ART: *Aerosols and reactive trace gases within the COSMO model* // In book: Baklanov A., Mahura, A., Sokhi R. (eds.). Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models. Springer. 2011. P.75-80.

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

Ю.М. Тимофеев
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
tim@jt14934.spb.edu

Сделан обзор современных дистанционных наземных и спутниковых методов измерений характеристик газового состава атмосферы. Анализируются их преимущества и недостатки. Приведены конкретные примеры спутниковой аппаратуры и использования различных спутниковых методов для изучения газового состава тропосферы, стратосферы и мезосферы. Рассмотрены методы прозрачности, собственного излучения атмосферы, рассеянного солнечного излучения при различной геометрии измерений.

Дан обзор современных наземных дистанционных методов исследований газового состава атмосферы. Приведены примеры измерений, осуществляемых на кафедре физики атмосферы физического факультета СПбГУ. Проанализированы данные комплексных исследований газового состава атмосферы в Санкт-Петербурге с помощью Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения. Обсуждаются возможности определения элементов вертикальных профилей содержания атмосферных газов и синергетических подходов в дистанционных наземных и спутниковых измерениях.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПРИМЕСИ ПРИ ТОРФЯНОМ ПОЖАРЕ В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРМИ

К.Г. Шварц[1], В.А. Шкляев[1]
[1]Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь,
bmontana@yandex.ru

Представлены результаты численного моделирования процессов переноса загрязняющих веществ, выделяющихся при горении торфа вблизи города Краснокамска Пермского края. Для этого на основе трехмерной модели гидротермодинамики мезомасштабных процессов в нижнем слое атмосферы выведена новая квазидвумерная модель распространения многокомпонентной примеси от горячего точечного или площадного источника с учетом термической неоднородности подстилающей по-

верхности. Показано, что большая мощность источника тепла искривляет первоначальную траекторию переноса примеси. Это влияет на общее направление переноса примеси.

ОЦЕНИВАНИЕ ПОЛЕЙ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ПЫЛИ ОТ ПЛОЩАДНОГО ИСТОЧНИКА

Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф.
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, raputa@sscc.ru

В докладе обсуждаются методы численного анализа данных экспериментальных исследований аэрозольного загрязнения приземного слоя атмосферы от пылящих площадных источников. На основе численных и аналитических решений полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы разработаны модели оценивания полей массовой и счётной концентраций аэрозольных примесей. При их построении также используются различные асимптотические приближения, методы агрегирования параметров, априорные сведения о характеристиках источников примеси и протекающих атмосферных процессах, что позволяет существенно снизить в полученных моделях степень неопределённости и соответственно уменьшить требования к объёму необходимой экспериментальной информации.

На примере оз. Селитренное Алтайского края проводится численная интерпретация результатов экспедиционных исследований состава приземного аэрозоля. Источник представляет собой открытое хранилище кристаллического сульфата натрия площадью около 6 км^2. При определённых метеорологических условиях и технологических процессах возможен вынос с его поверхности в атмосферу значительной части сульфатных частиц размером менее 10 мкм. По данным маршрутных наблюдений численно восстановлены поля массовой и счётной концентрации сульфатного аэрозоля. Показано, что эффективные высоты подъёма частиц разных фракций существенно зависят как от их размеров, так и скорости ветра. Для близких состояний пыления поверхности озера и режима турбулентного обмена в приземном слое атмосферы, полученные оценки параметров дают возможность проводить численное моделирование процессов распространения сульфатного аэрозоля в окрестностях источника при произвольном направлении ветра.

IV. Взаимодействие атмосферы и океана

О ВЛИЯНИИ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОКЕАНА

[1]Аристов С.Н., [2]Просвиряков Е.Ю.,
[1]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
[2]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева КАИ, Казань, evgen_pros@mail.ru

Общепринятой точкой зрения в вопросе формирования приповерхностных течений мирового океана является наличие касательных (тангенциальных) напряжений, возникающих за счет ветра. Однако, принимая во внимание большие размеры вихревых образований, можно в качестве причины генерации таких течений можно указать нормальное давление атмосферы. Для доказательства этого факта решение трехмерной системы Навье-Стокса, описывающей взаимодействие атмосферы и океана, построено в виде разложения гидродинамических полей в ряды Тейлора, ограничиваясь при этом линейными слагаемыми слагаемыми для скорости и квадратичными для давления. Отметим, что коэффициенты разложения в рядах Тейлора зависят от поперечной координаты. Показано, что полученная система нестационарных уравнений с частными производными имеет точное решение, записанное в виде квадратуры. Проведен анализ полученного решения и построены области значения волнового числа, определяющего два сценария, которые могут быть использованы для прогноза погоды. При первом сценарии наблюдает выраженный прирост давления в центре вихря, что указывает на возрастание давления атмосферы на океан. Во втором случае вертикальная скорость имеет отрицательный знак, следовательно, жидкость подтекает к границе взаимодействия атмосферы и океана.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФСР МФП НТС (программа СТАРТ) и РФФИ *(проект № 12-01-00023-а).*

СЛАБАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ МОРСКИХ ВОЛН И НОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПЕРИОДОВ ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

С.И. Бадулин[1-3], *В.Г. Григорьева*[1,4]
[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, sergei.badulin@gmail.com
[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск
[3]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[4]МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

В последнее десятилетие наиболее массовым, распространенным и доступным источником информации о состоянии атмосферы и океана, несомненно, является спутниковая альтиметрия. Равномерное пространственно-временное покрытие поверхности Земли и огромный объем получаемых данных позволяют решать широкий круг научных и прикладных вопросов, в том числе задачи исследования и мониторинга ветрового волнения в Мировом океане.

Инициатива Европейского космического агентства (ESA) GlobWave (http:/globwave.org) обеспечила свободный доступ широкого круга пользователей к данным спутниковой альтиметрии, содержащим параметры ветрового волнения. Эти данные прошли необходимую первоначальную обработку и проверку, снимающую основные, наиболее ресурсоемкие вопросы преобразования непосредственно измеренных сигналов к физическим величинам. Точность измерения полученных таким образом физических величин оценивалась как в измерениях на постоянно действующих подспутниковых полигонах, морских судах, автономных буйковых станциях, так и путем сравнения данных разных спутников в окрестностях пересечений их орбит.

Сравнение результатов разных видов измерений является основным инструментом не только для контроля качества дистанционных измерений, но и для получения дополнительной информации о состоянии океана. Параметризации новых величин в терминах измеряемых характеристик, очевидно, возможны только в рамках определенных моделей, дающих искомые связи и определяющих пределы справедливости самих моделей. Если такие модели отсутствуют, могут быть использованы (и широко используются) гипотезы о существовании таких связей.

Форма отраженного сигнала, принимаемого альтиметром, определяется геометрией отражающей поверхности, что позволяет рассчитать характерную (среднюю либо значимую) высоту волнения, нуждающуюся в корректировке и калибровке. Оценка же пространственного масштаба ветровых волн (периода волн T) по альтиметрическим дан-

ным не может быть проведена аналогичным образом и, в настоящее время, базируется исключительно на параметрических зависимостях, постулирующих связь волнового периода с измеренной по форме отраженного импульса высотой волнения H_s и сечением обратного рассеяния σ_0 [3,5,6].

В этой работе показано несоответствие широко использующихся параметрических моделей волновых периодов существующим представлениям о росте ветровых волн. Авторы предлагают использовать физическую модель слаботурбулентной теории ветрового волнения [1] для оценки волновых периодов по измеренным значениям высоты волн и ее пространственной производной. Такая модель, очевидно, предполагает множество физических ограничений на условия развития волнения, однако, не содержит никаких подгоночных коэффициентов. Единственный параметр модели - параметр автомодельности α_{ss} [1], слабо зависит от неизвестного априори состояния ветрового волнения, что было показано в масштабных численных экспериментах [2]. В настоящей работе использовалось значение $\alpha_{ss}=0.67$, отвечающее случаю растущего ветрового волнения [2].

Работоспособность предлагаемой физической модели была апробирована на двух принципиально различных массивах волновой информации: спутниковых данных архива Globwave и данных попутных судовых наблюдений [4] для нескольких акваторий с существенно разными условиями развития ветрового волнения.

Сравнение полученных периодов ветрового волнения с результатами эмпирических параметризаций [3,5,6] показало удовлетворительное соответствие различных методов оценки даже в условиях, когда градиент высоты волнения рассчитывался по единственному направлению вдоль спутникового трека. Для случаев пересечений спутниковых треков (matchup points) удалось провести более детальное сравнение, которое позволило оценить степень завышения значений волнового периода при стандартном использовании новой методики. Для океанских условий такая переоценка, как правило, не превышает разброса, даваемого различными параметрическими формулами [3,5,6].

Рассмотренная физическая модель кроме своей работоспособности показывает адекватность оценки пространственной изменчивости поля ветровых волн по данным альтиметрии: изменения высоты волнения в пределах первых десятков сантиметров между последовательными измерениями альтиметра можно считать обеспеченными точностными характеристиками приборов и методов обработки. Таким образом, возможной оказывается постановка задачи об исследованиях характеристик взаимодействия волн с ветром по данным альтиметрических измерений.

Работа выполнена при поддержке грантов Правительства РФ (Договоры №№11.G34.31.0035, 11.G34.31.0078, 11.G34.31.0007) для исследований под руководством ведущих ученых и гранта РФФИ 11-05-01114-а.

1.Badulin, S.I., A.V. Babanin, D.Resio, and V.Zakharov, *Weakly turbulent laws of wind-wave growth*, J. Fluid Mech., 591, 339-378, 2007.
2.Gagnaire-Renou, E., M. Benoit, and S. I. Badulin, *On weakly turbulent scaling of wind sea in simulations of fetch-limited growth*, J. Fluid Mech., 669, 178-213, 2011
3.Gommenginger, C.P., M.A. Srokosz, P.G. Challenor, and P.D. Cotton, *Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model*, Geophys. Res. Lett., 30(22), 2150, doi:10.1029/2003GL017743, 2003.
4.Gulev, S.K., V. Grigorieva, A. Sterl, and D. Woolf, *Assessment for the reliability of wave observations from voluntary observing ships: insights from the validation of a global wind wave climatology based on voluntary observing ship data*, J. Geophys.Res., 108(C7), 3236, doi: 10,1029/2002JC001437, 2003.
5.Mackay, E. B.L., C.H. Retzler, P.G. Challenor, and C.P. Gommenginger, *A parametric model for ocean wave period from Ku-band altimeter data*, J. Geophys. Res., 113(C03029), doi: 10.1029/2007JC004438, 2008.
6.Quilfen, Y., B. Chapron, and M. Serre, *Calibration/validation of an altimeter wave period model and application to TOPEX/Poseidon and Jason-1 altimeters*, Marine Geodesy, 27, 535-549, 2004.

БЫСТРОЕ ТАЯНИЕ ПРИПАЙНОГО ЛЬДА В ЗАЛИВЕ СОГО (ГУБА БУОР-ХАЯ, МОРЕ ЛАПТЕВЫХ)

П.В. Богородский, А.П. Макштас, В.Ю. Кустов
Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, bogorodski@aari.nw.ru

Представлены и проанализированы данные измерений радиационных и термодинамических характеристик припая залива Сого, выполненных в конце мая - начале июня 2011 г., на основе которых исследованы особенности термометаморфических процессов в ледяном покрове. Особое внимание уделено процессу быстрого расплавления его верхних слоев, когда за сутки практически весь припайный лед, в пределах видимости, покрылся слоем талой воды. Данные наблюдений дополнены результатами расчетов, проведенных с помощью концептуальной термодинамической модели, последовательно описывающей различные этапы таяния ледяного покрова (внутреннее таяние, сход снега, расплавление верхних слов льда). , общими для которых являются граничные условия и параметризация процессов энергообмена на внешних границах. Несмотря на ряд упрощений, модель оказалась достаточно эффективной и позволила не только количественно воспроизвести скорость таяния и временную изменчивость формирующегося на

верхней границе ледяного покрова слоя талой воды, согласующихся с результатами наблюдений в начальный, наиболее важный период таяния припайных льдов, но и оценить применимость ряда параметризаций процесса формирования снежниц.

Анализ натурных и расчетных данных показал, что триггером для начала столь интенсивного таяния снежно-ледяного покрова стало кратковременное (около 36 час.) повышение температуры воздуха (до +12°C), обусловившее скачкообразное уменьшение альбедо подстилающей поверхности от величины, характерной для свежевыпавшего снега (0.8), до альбедо водной поверхности (0.2) и, как следствие, роста доли поглощенной солнечной радиации, обеспечившей ускорение процесса таяния. При этом однородность верхней поверхности припая определила быстрое распространение снежниц вплоть до покрытия достаточно глубоким слоем воды (до 25 см) всей наблюдаемой поверхности припайных льдов, толщина которых при этом достигала более 2 м. Данное обстоятельство может послужить источником ошибок при оценке состояния (наличия) ледяного покрова по данным ИСЗ.

ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ МОРСКОГО ЛЬДА – МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОТОКОВ.

Р.С. Бортковский
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург,
rsb@main.mgo.rssi.ru

Ото льда пресных водоемов морской лед отличается порозностью, которая определяет его заметную газопроницаемость. Натурные измерения еще 40 лет назад показали, что при сравнительно высокой температуре воздуха углекислый газ легко проходит через морской лед. Газообмен атмосфера-море через лед, однако, не учитывается в современных моделях климата.

Разработанная численная модель описывает газоперенос через морской лед, как при росте толщины льда, так и при таянии льда. Нарастание льда происходит, в основном, снизу. Влияние этого процесса на структуру подледного слоя воды ограничено стеканием под лед рассола, его соленость достигает 100 о/оо. Таяние льда начинается, когда лед становится сверху совсем пресным, соленость льда внизу не достигает 5 о/оо. Стаивание идет и сверху и снизу. Через толщу льда сверху идет сток пресной воды. Подо льдом она смешивается с солоноватой водой, образуя подслой талой воды. В модели учтены эти особенности стадий существования морского льда.

Реализация модели дала средние значения потоков CO_2 и O_2 через лед в акватории Чукотского моря (74°с.ш., 166°з.д.) для всех месяцев года. Сопоставление этих величин с потоками газов через морскую поверхность при отсутствии ледового покрова демонстрирует значимость газообмена атмосфера-море через однолетний лед, толщина которого не превышает одного метра.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ НАД ПОЛЫНЬЯМИ И РАЗВОДЬЯМИ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОЙ ФОНОВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ

А.В.Дебольский[1], *В.М.Степаненко*[2,1]
[1]Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва,
and.debol@gmail.com
[2]Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

На настоящий момент Арктика является регионом наиболее значительных климатических изменений. В то же время, при моделировании современного климата Арктики с помощью глобальных климатических моделей результаты различных моделей заметно расходятся как друг с другом, так и с данными наблюдений. Одной из причин такого несовпадения является неточность воспроизведения моделями ледяного поля, а также распределения снежного покрова. Механизмы, вызывающие неточность в распределении ледяного поля, в свою очередь, могут быть ошибки в радиационном балансе, ошибки в температуре и солености воды, появляющиеся в моделях циркуляции океана, ошибки в параметризации турбулентных потоков в пограничном слое атмосферы. В данной работе исследуется влияние последнего фактора. Дело в том, что пограничный слой надо льдом почти всегда является устойчиво стратифицированным, в то время как над открытой водой, вследствие того, что ее температура значительно выше, чем температура воздуха над ней, формируется конвективный пограничный слой. Таким образом, в окрестности кромки льда устойчиво стратифицированный слой сменяется конвективным, что приводит к возникновению различных явлений, например циркуляционных «валиков», имеющих горизонтальный масштаб до ~10 км, которые явно не воспроизводятся в глобальных моделях циркуляции атмосферы, ввиду того, что на устойчиво стратифицированный приземный слой (высота порядка первых десятков метров) приходится в лучшем случае несколько уровней модели, а горизонтальное разрешение превосходит масштаб валиков. Таким образом, анализ влияния внутренних пограничных слоев и связанных с ними мезомас-

штабных циркуляций на обмен атмосферы с поверхностью должен производиться с помощью моделей, воспроизводящих турбулентные течения явно, так как эмпирических данных с достаточно высоким временным разрешением для анализа турбулентных потоков очень мало и при их использовании возникает целый ряд известных проблем (выбор оптимального периода осреднения, справедливость гипотезы Тейлора, и т.д.).

В данной работе производится попытка уточнения мозаичного метода агрегирования потоков, являющегося наиболее распространенным в моделях климата и прогноза погоды [1], в случае неоднородной по температуре и шероховатости поверхности, представленной участками открытой воды и льда. Основной идеей работы является сравнение турбулентных потоков тепла и влаги, полученных из численных экспериментов с вихреразрешающей моделью (LES) и рассчитанных по мозаичному методу, интерпретируя область эксперимента как «ячейку» глобальной модели. При этом в вихреразрешающей модели бóльшая часть спектра кинетической энергии турбулентности, являющегося «подсеточным» для глобальных моделей, разрешается явно, так что воспроизводимые ею турбулентные потоки можно считать «эталоном».. В качестве вихреразрешающей модели используется LES-модель ИВМ РАН/НИВЦ МГУ [2][3],с шагом сетки порядка 10 м. Используются наиболее типичные для Арктики значения параметров поверхностей льда и воды, профили ветра, температуры и влажности. Также производится анализ различных характеристик пограничного слоя, воспроизводимых моделью: высоты пограничного слоя, профилей коэффициентов турбулентности, кинетической энергии.

1. V.M. Stepanenko, P.M. Miranda, V.N. Lykosov. *Numerical simulation of mesoscale interaction of atmosphere and hydrological inhomogeneous surface*. Computational technologies,2006, vol. 11 No.S7: pp.118-127.
2. A.V. Glazunov, V.N. Lykossov. *Large eddy simulation of interaction of ocean and atmospheric boundary layers*. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling. 2003 Vol.18, No. 4: pp.279-295.
3. Глазунов А.В. *Моделирование нейтрально стратифицированного турбулентного потока воздуха над горизонтальной шероховатой поверхностью*//Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 307-325.

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

В.В. Ефимов
Морской гидрофизический институт, НАНУ, Севастополь, vefim38@mail.ru

1. В атмосфере черноморского региона под влиянием моря и окружающих гор развиваются характерные мезомасштабные структуры. спутниковые данные дают возможность идентифицировать их, а численные модели региональной атмосферной циркуляции типа WRF и HADRM3P воспроизводить и изучать их структуру. были исследованы несколько мезомасштабных процессов.

2. Температурные контрасты суша-море на суточных масштабах определяют бризовую циркуляцию как элемент вентиляции сухопутных областей и возбуждения прибрежной циркуляции. на климатических масштабах контрасты определяют сезонную изменчивость поля завихренности над морем.- муссонный эффект.

3. Краевые области горных хребтов кавказских и крымских гор являются зоной возбуждения распространяющихся над морем квазидвумерных вихревых структур, для которых исследованы структура и баланс энергии .

4. Выделены гидродинамические режимы черноморской боры, определяющие особенности формирования структуры и порывистости струйных течений.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛА ПО ДАННЫМ ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЙ.

Зиновьев Н.С., Макштас А.П., Тимачёв В.Ф., Кустов В.Ю., Соколов В.Т.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, zinoviev@aari.nw.ru

Проблема понимания турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы (в особенности в устойчивом или сильно устойчивом состоянии) является ключевой в его моделировании. Наиболее отчётливо эта проблема проявляется при моделировании процессов взаимодействия атмосферы и океана при наличии ледяного покрова. В значительной степени прогресс в её решении сдерживается нехваткой долгопериодных рядов прямых натурных наблюдений за турбулентными потока-

ми тепла, необходимых для разработок новых параметризаций пограничного слоя или для валидаций его моделей.

Алгоритмы расчёта турбулентных потоков тепла напрямую зависят от точности расчёта динамической скорости ветра U_*, масштаба температуры воздуха T_* или влажности θ_*, для которых используются различные параметризации. Для сравнения оценок этих характеристик были выполнены расчеты турбулентных потоков по данным градиентных наблюдений на дрейфующей станции «Северный Полюс-35» (21.09.2007– 16.07.2008 г.). Датчики температуры воздуха и относительной влажности располагались на высоте 2м, датчик скорости ветра на 10м от снежно-ледяного покрова. Температура подстилающей поверхности измерялась контактным методом и с помощью радиометра. Для расчётов турбулентных потоков использовался ряд известных параметризаций (de Bruin (1988), Beljaars и Holstag (1991), Cheng и Brutsaert (2005), Grahev и др. (2007)). Результаты расчётов показали, что при их использовании значения явного тепла довольно близки между собой. Наибольшие значения поток явного тепла достигает при стратификации близкой к нейтральной или неустойчивой. Рассмотрение зависимости коэффициента сопротивления и числа Стэнтона от параметра устойчивости при различном масштабе показывает, что при устойчивой или сильно устойчивой стратификации атмосферы можно считать число Стэнтона постоянным, что значительно упрощает расчёт турбулентных потоков.

1. Зилитинкевич С.С. *Динамика пограничного слоя атмосферы*.Л: Гидрометеоиздат, 1970, 292 с.
2. Монин А.С., Обухов А.М. *Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы* // Труды Геофизического института АН СССР, 1954, №24(151), С. 163-187.
3. Beljaars A.C.M., Holstag A.A.M. *Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models* // J. Appl. Meteorol., 1991, Vol.30, P.327-341.
4. Cheng Y.G., Brutsaert W. *Flux-profile relationships for wind speed and temperature in the stable atmospheric boundary layer* // Boundary-Layer Meteorol. 2005, Vol.114, P. 519-538.
5. Grachev A.A., Andreas E.I., Fairall C.W., Guest P.S., Persson P.O. *SHEBA flux-profile relationships in the stable atmospheric boundary layer* // Boundary-Layer Meteorol., 2007, Vol.124, P.315-333.
6. Holtslag A.A.M., de Bruin H.A.R. *Applied modelling of the nighttime surface energy balance over land* // J. of Appl. Meteorol., 1988, Vol. 27, P. 689-704.

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГОМАССООБМЕНА В АРКТИЧЕСКИХ ПОЛЫНЬЯХ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ ПОЛЫНЬИ «КИТОВАЯ БУХТА», АРХИПЕЛАГ ШПИЦБЕРГЕН)

Иванов Б.В.[1,2], *Тимачев В.Ф.*[1], *Бедненко В.М.* [2,1], *Журавский Д.М.*[1], *Павлов А.К.*[1,3], *Макштас А.П.*[1]

[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, b_ivanov@aari.ru

[2]Санкт-Петербургский государственный университет

[3]Arctic Program of Early Carrier Scientists (APECS), Tromsø, Norway

Обсуждаются результаты зимней экспедиции в район к северу от архипелага Шпицберген (полынья «Китовая бухта», январь 2012 г.) на норвежском научно-исследовательском судне «H. Helmer». В экспедиции принимали участие специалисты университетов Тромсе и Свальбарда, Норвежского Полярного института и Арктического и антарктического НИИ. На основе стандартных и специальных судовых метеорологических и актинометрических наблюдений были рассчитаны турбулентные потоки явного и скрытого тепла, а также составляющие длинноволнового радиационного баланса, оценена суммарная теплоотдача в атмосферу с поверхности полыньи с учетом концентрации дрейфующих льдов. Использовался алгоритм, разработанный в ААНИИ на основе полуэмпирической теории Монина-Обухова и адаптированный к условиям судовых наблюдений (Макштас, Иванов, 1989). Для описания условий стратификации в приводном слое атмосферы над полыньей использовались функции Бузингера и Дайера [Businger et al., 1971; Dyer, Hicks, 1970] для случая неустойчивой стратификации и подходы, предложенные в работе [Grachev et al., 2007], для условий устойчивой стратификации. Параметр шероховатости для открытой воды определялся в соответствии с известными рекомендациями [Smith S.D., 1988; Andreas E.L. et. al. 2005]. При наличии ледяного покрова значения коэффициента обмена рассчитывались по формуле, предложенной в работе [Andreas E.L. et al., 1984], и полученной по данным натурных наблюдений в прикромочной зоне моря Уэдделла. Рассчитанные оценки суммарной теплоотдачи в атмосферу с поверхности полыньи в январе 2012 г. сравниваются с результатами, полученными в этом же районе с борта российского научно-исследовательского ледокола «Отто Шмидт» в феврале 1986 г., а также с особенностями синоптической обстановки к северу от архипелага Шпицберген.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РОССИЙСКИХ ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЯХ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС»

Макштас А.П., Соколов В.Т., Кустов В.Ю., Зиновьев Н.С.
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, maksh@aari.ru

В последние годы климат Арктики претерпевает радикальные изменения, которые происходят во всех компонентах арктической климатической системы (океане, атмосфере и морском ледяном покрове). Эти изменения обусловлены как наблюдаемым в настоящее время глобальным потеплением, так и процессами регионального масштаба. К их наиболее очевидным проявлениям следует отнести уменьшение площади и толщины морского ледяного покрова, самого чувствительного элемента арктической компоненты климатической системы Земли. Существует предположение, что в относительно недалеком будущем ледяной покров Северного Ледовитого Океана может приобрести сезонный характер. С другой стороны ряд исследователей считает возможным, что в ближайшее время начнется его возвращение к состоянию, характерному для предшествующих десятилетий. Основной причиной неопределенности предсказаний будущего состояния ледяного покрова является явная недостаточность систематических инструментальных наблюдений в Северном Ледовитом Океане. В настоящее время Россия является единственной страной, выполняющей и непрерывно расширяющей как комплексный мониторинг природной среды Центральной Арктики, так и исследования физических процессов, определяющих ее состояние. Последние особенно важны с точки зрения совершенствования численных моделей прогноза климата - основного инструмента, позволяющего выявить тенденции происходящих и возможных будущих изменений основных характеристик окружающей среды Арктики.

Для получения принципиально новых данных об упомянутых выше процессах на дрейфующих станциях «Северный полюс – 35 - 40» были развернуты комплексные метеорологические наблюдения. В их состав входят как стандартные метеорологические и аэрологические наблюдения, так и исследования процессов взаимодействия океана, морского ледяного покрова и атмосферы. В кооперации с учеными Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (ФРГ) на «СП-35-38» были проведены аэростатные наблюдения за температурой и влажностью воздуха, направлением и скоростью ветра в пограничном слое атмосферы, позволившие более детально, по сравнению с радиозондированием, исследовать структуру АПС.

В 2012 г. на дрейфующей станции «СП-39» эти исследования были продолжены с помощью разработанного в НПО «Тайфун» (г. Обнинск) метеорологического температурного профилемера МТР-5РЕ. Результаты измерений позволили выявить сложную нестационарную структуру нижнего слоя атмосферы, обусловленную, в том числе, формированием инверсий нижнего уровня. Комплексный анализ физических процессов в нижнем слое атмосферы с привлечением данных непрерывных измерений характеристик облачности, выполняемых с помощью установленного на станции лидара, предоставленного Лабораторией исследований системы Земли (НОАА, США), и данных измерений длинноволнового и коротковолнового радиационных балансов подстилающей поверхности, позволит максимально полно описать механизм формирования сильно-устойчивого АПС.

Другим перспективным направлением исследований, регулярно проводимых на дрейфующих станциях «Северный Полюс», начиная с «СП-35» (2007 г.), являются маршрутные съемки спектрального альбедо снежно – ледяного покрова и проникающей в верхний слой океана солнечной радиации. С этого же времени выполняются комплексные наблюдения за газовым составом приледного слоя атмосферы, позволившие выявить роль морского ледяного покрова в балансе углекислого газа, а также наблюдения за общим содержанием озона и его распределением в атмосфере до высоты 30 км, впервые инструментально зафиксировавшие в марте 2011 года появление озоновой дыра в Центральной Арктике.

В целом, созданный за последние годы метеорологический комплекс аппаратуры позволяет проводить небольшим, не более трех человек, метеорологическим отрядом подробные гидрометеорологические исследования от верхнего слоя океана до высоты порядка 30 километров в атмосфере, результаты которых будут и уже используются для совершенствования численных моделей прогноза погоды и климата.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ОКЕАНА НА ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ ЗАХВАЧЕННЫХ ВОЛН

Г.А. Платов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, platov.g@gmail.com

В качестве предварительной задачи при проведении данной работы необходимо было убедиться в возможности адекватного описания бере-

говых захваченных волн (БЗВ) с помощью численного моделирования, в том числе и их способности, распространять начальное ветровое (или какое-либо другое) возмущение на значительные расстояния вдоль береговой линии. Убедившись в этом, мы получаем возможность более детального изучения роли БЗВ в процессе взаимодействия прибрежной зоны с открытым океаном, в частности, можем оценить влияние неоднородностей береговой линии и топографии шельфа. При этом используется идеализированный рельеф и гидрологическая структура прибрежных вод, а численное решение получается при помощи Принстонской океанической модели.

В результате численного исследования характера распространения БЗВ выявились две важные особенности в плане регионального моделирования взаимодействия шельфовой зоны с открытым океаном.

Первая связана с тем, что цуг волн этого типа может формироваться в результате ветрового воздействия на значительном удалении от того места, где их влияние может проявиться. Распространение вдоль береговой линии происходит без существенных потерь энергии волны при условии, что береговая линия и рельеф шельфовой зоны не содержит особенностей сравнимых с радиусом Россби. Эксперименты показали, что волна теряет свою энергию при огибании мысов и при прохождении над подводными каньонами, в меньшей степени такие потери возможны в случае, когда береговая линия образует залив или бухту и в случае прохождения волны над подводным хребтом. Для регионального моделирования возможность удаленной генерации волн должна быть хорошо изучена и взята в расчет. Способ учета может состоять, например, в том, чтобы задавать амплитуду первой моды БЗВ на тех границах региональной модели, через которые возможно продвижение БЗВ внутрь области моделирования. Естественно, что для определения амплитуды первой моды нужны данные измерений уровенной поверхности вблизи береговой линии на соответствующих участках границы. Особенностью такого способа учета БЗВ является, то что, во-первых, данные должны быть соответствующим образом приготовлены и не содержать колебаний уровня, вызванных другими волнами, а во-вторых, важно помнить, что первая мода БЗВ энергетически содержит хотя и большую часть энергии цуга, но не всю.

Вторая особенность, связанная с БЗВ для регионального моделирования заключается в том, что распространяющаяся волна способна реализовать часть своей энергии на формирование аномалий плотности на шельфе путем подъема промежуточных вод из примыкающих к шельфовой зоне районов открытого океана. Естественно, что при этом часть шельфовых вод формирует противоположные аномалии в открытом

океане. Сформированные аномалии плотности имеют более протяженный временной масштаб по сравнению со временем прохождения береговой волны и, следовательно, могут определять характер шельфовой циркуляции в течение продолжительного времени.

Таким образом, береговые захваченные волны являются переносчиком ветровой энергии из районов действия ветра в другие прибрежные районы, где она может реализоваться посредством формирования аномалий плотности в другие виды движения. Такая особенность БЗВ не может быть проигнорирована при изучении шельфовой динамики и взаимообменах шельфовой зоны с открытым океаном посредством регионального моделирования.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ.

Г.А. Платов, Е.Н. Голубева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, platov.g@gmail.com

Одним из наиболее убедительных критериев при оценке достоверности совместной численной модели океана и льда Арктики является ее способность правильно воспроизводить географическую картину ледяного поля. В отличие от локальных измерений, восстановленное с помощью космических снимков поле льда имеет интегральный характер по пространству, что является необходимым условием для верификации численной модели.

Из существующего в данный момент арсенала численных моделей, охватывающих весь арктический регион, нет моделей, способных детально воспроизводить особенности ледяного поля Арктики. Одним из главных препятствий является недостаточное горизонтальное разрешение таких моделей. Поэтому решающими критериями являются характеристики, описывающие характер ледяного поля в масштабах одной ячейки сетки такой модели, т. е. на масштабах порядка десятков километров. В результате в ходе данного исследования в качестве критерия проверки различных параметризаций на границе атмосфера-лед-океан было выбрано положение границы ледяного поля. Ее положение оценено на основе космических снимков в периоды максимальной (март) и минимальной (сентябрь) протяженности ледяного поля. Имеющийся ряд наблюдений охватывает период с 1979 г.

Численные эксперименты с моделью ИВМиМГ проводились с использованием атмосферного форсинга CORE-2, основанного на результатах реанализа NCEP/NCAR и охватывающего период с 1948 г по наши дни. Период с 1979 г использовался для сравнения с имеющимися данными о границе поля льда. В ходе экспериментов изучались различные способы:

а) параметризации радиационно-облачных связей;

б) параметризации процессов торошения льда;

в) параметризации верхнего перемешанного слоя океана.

Результаты моделирования показали повышенную чувствительность модели к параметризации этих процессов не только в плане формирования ледяного покрова, но и в целом на общую циркуляцию вод в Северном Ледовитом океане. Кроме того, по результатам численных экспериментов была предложена параметризация верхнего перемешанного слоя океана, основанная на различии характера перемешивания и характера взаимодействия с нижними слоями атмосферы в областях с покрытой льдом и с открытой поверхностью океана.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СТРАТИФИКАЦИИ АТМОСФЕРЫ

И.А. Репина

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, iar.ifaran@gmail.com

На основании данных специализированных экспериментов выполнено физическое описание механизмов взаимодействия атмосферы и морской поверхности при слабых, сильных ветрах, в прибрежных зонах и над неоднородной поверхностью. Проведена разработка параметризаций турбулентного обмена атмосферы и морской поверхности (открытой и покрытой льдом) при различных фоновых условиях.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально подтверждена зависимость коэффициентов обмена и аэродинамической шероховатости от температурной стратификации при малых ветрах как над морской, так и над покрытой льдом поверхностью. Разработаны параметризации, позволяющие рассчитывать коэффициенты обмена при малых и умеренных ветрах с использованием стандартной метеорологической информации.

2. Из экспериментальных наблюдений обнаружено подавление турбулентного трения при ураганных ветрах над морской поверхностью, при снежных буранах и пыльных бурях. Предложено

при снежных буранах и пыльных бурях. Предложено объяснение физического механизма данного явления.

3. Представлены характеристики турбулентного тепло-, массообмена для различных поверхностей, свойственных Арктике. Обнаружено усиление тепло-массообмена над полыньями и разводьями за счет самоорганизации турбулентной конвекции.

В результате, по экспериментальным данным установлено, что при неустойчивой стратификации коэффициент сопротивления при малых ветрах уменьшается с увеличением скорости ветра. В частности, этим объясняется тот факт, что в конвективных условиях при $U \to 0$ динамическая скорость u_* нулю не равна. При нейтральной стратификации C_D практически не меняется, а при устойчивой стратификации увеличивается. Обращает внимание тот факт, что в реальных условиях завышенные значения коэффициента сопротивления при малых ветрах наблюдаются чаще, чем заниженные. Это связано прежде всего с тем, что условия сильно устойчивой стратификации на море достаточно редки. И, кроме того, от других факторов, влияющих на разброс данных (ошибки измерений, неоднородность подстилающей поверхности и пр.) Одновременные пульсационные и профильные измерения, в том числе и во время апвелинга, позволили исследовать зависимость коэффициента сопротивления от числа Ричардсона, характеризующего стратификацию атмосферы. Таким образом, подтверждается теоретически предсказанная зависимость коэффициента сопротивления и связанного с ним параметра шероховатости от стратификации атмосферы.

Данные наблюдений также подтверждают, что турбулентность может существовать и при числах Ричардсона выше критического. Уменьшение шероховатости поверхности при устойчивой стратификации подтверждает визуально наблюдаемый факт выглаживания морской поверхности при апвелингах.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ

Сергеев Д. Е[1]*., Степаненко В. М.*[1,2]
[1]Географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва,
dennis.sergeev@gmail.com
[2]НИВЦ МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

Полярные мезоциклоны продолжают привлекать к себе внимание благодаря своей сложной динамике, отличающейся от более крупных

синоптических объектов – циклонов и антициклонов. Эти мезомасштабные вихри являются короткоживущими объектами, которые образуются в арктических и антарктических морях, где данные метеорологических наблюдений достаточно разрежены. Поэтому эволюция полярных мезоциклонов представляется сложной задачей для численного прогноза ввиду недостатка начальных и граничных условий. Кроме того, эти мезомасштабные структуры оказывают воздействие на распределение льда, вдоль кромки которого они часто образуются, создавая благоприятные условия для своего развития. Такой эффект обратной связи при взаимодействии мезоциклона и ледяного покрова должен быть включен в модели прогноза погоды, а также в качестве параметризации подсеточных процессов – в глобальные климатические модели.

Зарождение полярных мезоциклонов все еще остается предметом дискуссий, хотя работы последнего десятилетия показывают сильную зависимость генерации мезоциклонов от степени бароклинности фонового потока, мерой которой является вертикальный сдвиг ветра. Другие исследования доказывают важность распределения льда и открытой воды в приполярных районах. Однако в большинстве проведенных работ фокус сделан на конкретный наблюдаемый вихрь, формирование которого подвержено одновременно многим факторам; почти ни в одном из исследований не предлагается ясной картины зарождения мезоциклона на основе серии идеализированных экспериментов, позволяющих выделить влияние отдельных факторов интенсификации начального возмущения.

Настоящая работа посвящена механизмам формирования полярных мезоциклонов на начальных стадиях их эволюции. Акцент будет сделан на воздействие параметров подстилающей поверхности, потому что многие мезоциклоны зарождаются именно благодаря неоднородному по пространству потоку тепла, как отмечается некоторыми исследователями. Такой форсинг, оказываемый подстилающей поверхностью, часто наблюдается вдоль границы льда и моря, особенно при интенсивном холодном вторжении воздуха со льда на теплую воду. Для такой ситуации характерны достаточно тонкий слой бароклинной атмосферы и мощные потоки тепла с поверхности, что обеспечивает растущий мезоциклон потенциальной энергией, преобразующейся затем в кинетическую энергию вихревого движения. В нашем исследовании будет показана роль различных параметров подстилающей поверхности (таких, как форма кромки льда, процентное содержание льда и воды в ячейке модельной сетки, толщина льда) на начальной фазе эволюции полярного мезоциклона. Помимо этого, будет показано, какое начальное состояние атмосферы благоприятно для генерации вихря и поддержания уже существующего.

В качестве метода исследования принимается серия идеализированных численных экспериментов на сетке размером около 1000×1000 км с высоким пространственным разрешением (до 2 км), в которых степень бароклинности, стратификации атмосферы, скорости фонового потока и начального возмущения, характеристики поверхности варьируются в пределах типично наблюдаемых значений. При этом используется подход, позволяющий полностью учесть нелинейные эффекты мезомасштабной динамики: применяется трехмерная негидростатичная мезомасштабная модель NH3D_MPI, совмещенная с одномерной моделью верхнего слоя океана (водоема) LAKE. Ключевым методом в данной работе является анализ бюджета доступной потенциальной и кинетической энергии. Кроме того, для выявления причин появления завихренности поля скорости проводится анализ каждого компонента уравнения тенденции вихря.

ОСРЕДНЁННОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАСЧЁТЫ ПЛОТНОСТИ И ТЕЧЕНИЙ В ЗОНЕ ФРОНТА ГОЛЬФСТРИМА

В.А. Соколов, С.П. Апухтина

Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова, Москва, vasokolov@inbox.ru

В работе показано, что в современных моделях циркуляции морской среды (моделях), использующих для расчётов плотности нелинейные уравнения состояния морской воды (УСМВ), полученные в условиях процессов малых масштабов осреднений, плотность рассчитывается с систематическими ошибками, возрастающими с ростом градиентов температуры – *T* и солёности – *S*. Установлено, что причина появления этих ошибок в расчётах плотности связана с отсутствием в них учёта *T*-*S* градиентов. Для подавления выявленных погрешностей расчёты плотности в циркуляционных моделях предлагается проводить с помощью осреднённых УСМВ, учитывающих эти характеристики. Для УСМВ произвольной формы разработаны методики их осреднения и проверки полученных осреднённых уравнений. С их помощью получено осреднённое УСМВ в форме (Brydon D., San S, Bleck R., 1999), являющимся алгоритмической формой УСМВ Юнеско - 80. Полученное осреднённое УСМВ позволило в несколько раз уменьшить величины отмеченных ошибок в расчётах плотности и связанные с ними ошибки в расчётах скоростей плотностных течений, достигавшие в зоне Гольфст-

рима 15%. Предложен способ использования осреднённого УСМВ для выявления скрытых дефектов в расчётных значениях термохалинных полей, основанный на свойстве морских вод уплотняться при их смешении.

МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА ПРИ СИЛЬНЫХ И УРАГАННЫХ ВЕТРАХ: МОДЕЛИ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ, ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА.

Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Кандауров А.А., Ежова Е.В., Казаков В.И.
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, yuliyatrinity@mail.ru

Одним из важнейших факторов, определяющих динамику тропических и полярных ураганов над морем, является взаимодействие атмосферного пограничного слоя с океаном. Количественной характеристикой этого взаимодействия является коэффициент аэродинамического сопротивления морской поверхности. На основании проведенных в последнее время измерений скорости ветра и турбулентных потоков при полетах через тропические циклоны на малых высотах над уровнем моря, а также с падающих GPS-зондов было открыто явление снижения (или насыщения) коэффициента аэродинамического сопротивления при ураганном ветре (эффект кризиса сопротивления).

Представлен обзор возможных механизмов снижения (насыщения) коэффициента сопротивления морской поверхности. Обсуждаются данные новых лабораторных экспериментов по изучению аэродинамического сопротивления поверхности воды при сильном ветре, в которых обнаружена тенденция к насыщению коэффициента сопротивления при ураганной скорости ветра Предложено количественное объяснение эффекта насыщения аэродинамического сопротивления в рамках квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью с учетом вклада высокочастотной части спектра волнения в аэродинамическое сопротивление поверхности воды.

Обсуждается влияние брызг на обмен импульсом в пограничном слое атмосферы над морем. Описывается стохастическая модель «жизненного цикла» капли, срываемой ветром с гребня крутой поверхностной волны и затем падающей в воду, основанная на использовании марковской цепи для описания взаимодействия капель воды в пограничном слое атмосферы с турбулентными флуктуациями. Очевидно, что в зависимости от особенности поля скорости воздушного потока, параметров волны и радиуса капли она может в течение своего жизнен-

ного цикла от отрыва от поверхности воды до падения в воду как получать, так и отдавать импульс воздушному потоку, а вклад капель в баланс импульса воздушного потока определяется суммарным балансом импульса капель. Вычисления в рамках модели показали, что обмен импульсом с брызгами может приводить как к слабому (не более 10%) увеличению аэродинамического сопротивления поверхности, так и к слабому его снижению в зависимости от использованной модели инжекции капель в поток с поверхности воды. Представлены предварительные данные о лабораторных экспериментах по исследованию механизмов инжекции капель воды в поток при ураганном ветре, которые проводятся на высокоскоростном ветроволновом канале ИПФ РАН и основаны на проведении скоростной видеосъемки.

Обсуждаются возможности дистанционной активной микроволновой диагностики скорости ветра в условиях шторма и урагана. Одна из важнейших открытых проблем дистанционного зондирования Земли связана с тем, что имеющиеся алгоритмы восстановления геофизических параметров имеют значительные погрешности при оценке параметров атмосферы и океана в условиях интенсивных штормов. Это связано с насыщением модельных геофизических функций, представляющих собой удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) поверхности воды как функцию скорости ветра при скоростях ветра, превосходящих 25 м/с. Результатом этого являются потери данных в области максимальных скоростей ветра. В последнее время было предложено использовать для диагностики скорости ветра интенсивность рассеяния на перекрестной поляризации, которая тенденции к насыщению не имеет. Представлены предварительные данные лабораторных экспериментов, проведенных на высокоскоростном ветроволновом канале ИПФ РАН по исследованию рассеяния радиоволн X-диапазона на поверхности воды на прямой и перекрестной поляризациях. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения рассеяния на перекрестной поляризации для дистанционного измерения ураганных ветров.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (договор №11.G34.31.0048); Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 02.740.11.5225).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА КАК ЗАДАЧА ФИЗИКИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПЕРСПЕКТИВЫ

Яковлев Н.Г. [1,2], *Голубева Е.Н.*[3], *Платов Г.А.*[3]
[1]Институт вычислительной математики РАН, Москва
[2]Институт океанологии РАН, Москва
[3]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, elen@ommfao.sscc.ru

В 2002 году был официально начат международный проект сравнения моделей Северного Ледовитого океана (СЛО) AOMIP. Основной задачей, которая ставилась на старте проекта, было более глубокое понимание физических механизмов формирования среднего состояния и изменчивости вод и морского льда северной полярной области Мирового океана для их более точного воспроизведения в моделях Земной системы (моделях IPCC-класса). Несмотря на значительный прогресс, основные задачи, которые ставились в начале проекта, так и не были решены.

Так, не было получено ответа на механизмы формирования наблюдаемой циркуляции атлантических и тихоокеанских вод, а, следовательно, не были сформулированы априорные требования к моделям, которые должны воспроизвести эту циркуляцию. Многие результаты, полученные различными моделями по унифицированному внешнему форсингу, оказались сильно отличающимися друг от друга и от данных наблюдений, причем на качество модельных результатов по сравнению с данными наблюдений формальное пространственно-временное разрешение не имеет определяющего значения. Все это позволяет предположить, что в настоящее время задачу моделирования динамики СЛО следует рассматривать не только как задачу вычислительной математики и вычислительных технологий, а скорее как физическую задачу по определению наиболее существенных масштабов и связанных с ними физических процессов. Проблема усложняется тем, что существующая наблюдательная сеть не дает достаточного материала, особенно для глубокого океана , для обычного диагноза.

В докладе дается описание проекта AOMIP и следующего за ним проекта FAMOS, участвующих в нем моделях и основных задачах по воспроизведению тех или иных характеристик СЛО: исследование циркуляции атлантических и тихоокеанских вод, эволюции пресной воды в СЛО, выяснение особенности циркуляции на материковом склоне, изучение состояния морского льда. Обсуждается многолетний опыт авторов, полученный ими в ходе выполнения проектов AOMIP и интегриро-

ванного европейского проекта DAMOCLES по выполнению Международного Полярного года. Делаются оценки необходимого пространственного разрешения моделей и обсуждаются пути совершенствования физических параметризаций или возможности прямого описания различных процессов (глубокая и склоновая конвекция, подледные пограничные слои, влияние внешнего и внутреннего прилива, выбор реологии морского льда и параметризация процессов торошения).

SPACE-TIME VARIABILITY OF THE FIELD OF MECHANICAL ENERGY TRANSFER FROM THE ATMOSPHERE TO THE INDIAN OCEAN

Polnikov V.G., Pogarskii F.A, Golitsyn G.S.
Obukhov Institute of Atmospheric Physics of RAS, Moscow, polnikov@mail.ru

For the first time a simulation of the field of mechanical energy transfer from the atmosphere into the ocean (MET) is executed on the basis of traditional numerical simulation of the wind-wave evolution in the Indian Ocean for the period 1998 to 2009. The field MET is described by two integral values calculated per unit area: the total rate of energy flux from wind to waves and the rate of wind-wave energy loss. To solve this problem the wind field from the archive of NCEP / NOAA was used, and all the fields were calculated by using numerical model WAM with the modified source function proposed by Polnikov(2005). The analysis of the MET fields includes: mapping the fields with different scales of space-time averaging, partition of the fields into 6 zones in the Indian ocean area, estimation of extreme and average values of the MET, assessment of the 12-year trend of integral quantities of MET. These results are expanding significantly the area of the air-sea interaction research, and clarify a number of estimates obtained earlier.

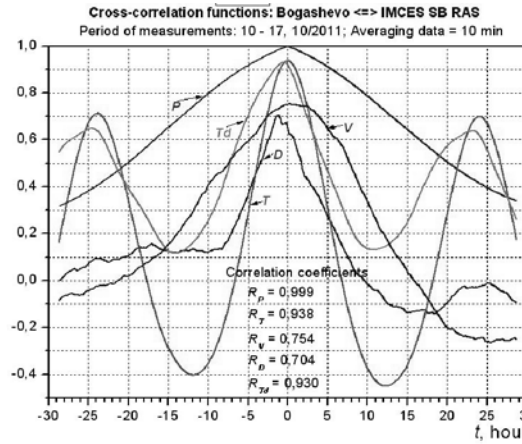
V. Распространение волн

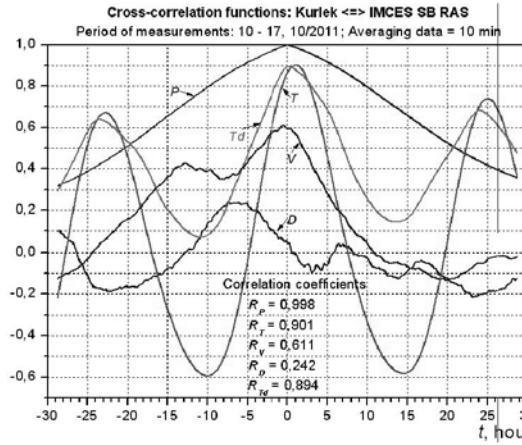
РЕГИОНАЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕТЬ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТЕОСТАНЦИЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДАННЫХ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЙ

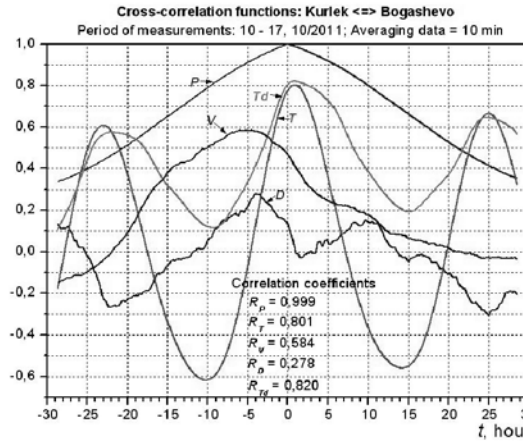
А.Я. Богушевич, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров
Институт мониторинга экологических и климатических систем СО РАН, Томск,
bay@imces.ru

В ИМКЭС СО РАН на протяжении последних 17 лет разрабатываются и изготовляются автоматические метеостанции серии АМК-03 [1-5], предназначенные для измерения основных метеорологических параметров атмосферы: скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, а также большой совокупности числовых характеристик атмосферной турбулентности. В этих метеостанциях используется ультразвуковой метод измерения скорости ветра и температуры воздуха. Модульный принцип построения АМК-03 позволяет компоновать из ее основных элементов различные типы метеостанций, из которых можно интегрировать и более сложные комплексные информационно-измерительные системы.

На основе этих метеостанций нами создан в окрестности г. Томска прототип пространственной информационно-измерительной системы (ИИС) [6], выполняющей синхронные метеорологические измерения в автоматическом режиме для локального региона. Инструментальную основу системы составляет сеть постов АМК-03 в комплекте с разработанным GPRS-контроллером, автоматически передающих по сотовой связи (или через Интернет) данные измерений на сервер, сохраняемые в нем в базе данных. Они доступны пользователям с помощью разработанного клиентского программного обеспечения (в виде Windows-приложения), которое позволяет на удаленном компьютере запрашивать и получать через Интернет данные измерений любого поста АМК-03 как текущие, так и за любой предыдущий период времени. Созданный экспериментальный вариант ИИС к настоящему моменту включает четыре стационарных поста измерений, удаленных друг от друга на расстояния от 14,2 до 61,6 км. С декабря 2010 г. ИИС работает в непре-


Cross-correlation functions: Bogashevo <=> IMCES SB RAS
Period of measurements: 10 - 17, 10/2011; Averaging data = 10 min
P
Td
V
D
T
Correlation coefficients
R_P = 0,999
R_T = 0,938
R_V = 0,754
R_D = 0,704
R_{Td} = 0,930
t, hour


Cross-correlation functions: Kurlek <=> IMCES SB RAS
Period of measurements: 10 - 17, 10/2011; Averaging data = 10 min
P
T
Td
V
D
Correlation coefficients
R_P = 0,998
R_T = 0,901
R_V = 0,611
R_D = 0,242
R_{Td} = 0,894
t, hour


Cross-correlation functions: Kurlek <=> Bogashevo
Period of measurements: 10 - 17, 10/2011; Averaging data = 10 min
P
Td
V
T
D
Correlation coefficients
R_P = 0,999
R_T = 0,801
R_V = 0,584
R_D = 0,278
R_{Td} = 0,820
t, hour

рывном мониторинговом режиме набора рядов статистических данных по значениям метеорологических величин в приземной атмосфере.

Одним из важнейших условий возможности статистической интерполяции – экстраполяции метеорологических величин над территорией, охваченной постами наблюдений, является наличие в них пространственно-временной корреляции между данными измерений [7]. Корреляционные свойства метеорологических полей для создаваемой региональной сети в значительной степени определяют требования к реализации в ней плотности инструментальных измерений во времени и пространстве. Поэтому в докладе, кроме описания самой ИИС, приводятся экспериментальные оценки корреляционных свойств метеорологических величин, измеряемых ИИС, включая оценки дополнительных факторов, влияющих на эти свойства (в том числе используемого времени усреднения первичных данных).

На рисунке в качестве примера показаны функции взаимной пространственно-временной корреляции метеорологических величин, полученных с трех постов наблюдений в ИИС («Богашово», «ИМКЭС» и «Курлек») при обработке с 10-минутным усреднением первичных данных измерений за период с 10 по 17 октября 2011 г. Здесь они приводятся для температуры воздуха (T), скорости ветра и направления ветра (V и D), атмосферного давления (P) и температуры точки росы (Td). Там же приведены числовые значения максимумов коэффициентов взаимной корреляции R_i для указанных метеорологических величин, оцениваемых по уровню 0,5. Из рисунка видно, что интервалы временной корреляции обычно составляют величины порядка несколько часов, имеют разные значения для каждой из метеорологических величин, зависят от текущей общей метеорологической обстановки в районе, охваченном сетью постов, но при этом практически одинаковы для синхронных данных соседних постов. Как и ожидалось, наибольшие значения интервала корреляции характерны для атмосферного давления, а наименьшие – для скорости и направления ветра.

1. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С. и др. *Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03* // Метеорология и гидрология, 2006, № 11. С. 89-97.
2. Патент RU 2319987, МПК G01W 1/02. *Ультразвуковой термоанемометр с устройством автоматического восстановления точностных характеристик измерений* / Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Шелевой В.Д. // Бюл., 2007, № 8.
3. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. *Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03* // Метеорология и гидрология, 2009, № 2. С. 101-106.

4. Тихомиров А.А., Корольков В.А., Богушевич А.Я., Азбукин А.А., Шелевой В.Д. *Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин* // Вестник Академии военных наук, 2008, № 3 (24). С. 144-148.
5. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. *Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации* // Датчики и системы. 2012, № 3. С. 47-52.
6. Богомолов В.Ю., Богушевич А.Я., Гордов Е.П., Корольков В.А., Крупчатников В.Н., Тихомиров А.А. *Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений* // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 1. С. 52-59.
7. Комаров В.С., Попов Ю.Б., Суворов С.С., Кураков В.А. *Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии* // Из-во ИОА СО РАН, Томск, 2004. 235 с.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

Гаврилов Н.М.[1], *Кшевецкий С.П.*[2]
[1]Санкт Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, gavrilov@pobox.spbu.ru
[2]Калининградский государственный университет, Калининград

Теоретически и численно исследуется разрушение внутренних гравитационных волн в атмосфере. Показано, что вихри с размером меньшим масштаба температурной стратификации разрушаются на вихри более мелкого масштаба. Механизм разрушения основан на том, что вихрь воздействует на стратификацию, и с течением времени внутри вихря формируются структура, в которой чередуются фрагменты с повышенной и пониженной плотностью, с большими градиентами плотности. Устойчивость нарушается и вихрь распадается на более мелкие. Процесс каскадный, и может быть одним из важных механизмов образования турбулентности в стратифицированной среде. Хорошо известный механизм разрушения внутренних гравитационных волн основан на том, что, если амплитуда волны достаточно велика, то волна нарушает условие статического равновесия стратификации. В этом случае волна быстро разрушается, и образуется турбулентный слой. Еще один механизм разрушения волны основан на том, что волна создает индуцированное течение со сдвигом. На сдвиге скорости, при достижении достаточно большого градиента, волна разрушается. Интересно что выше волна восстанавливается. При расчете распространения и разрушения акустико-гравитационных волн очень важно качество численных методов. Численный метод должен быть консервативным, то есть под-

держивать законы сохранения массы, импульса, энергии. С математической точки зрения, и с физической точки зрения тоже, важно выполнение закона сохранения энтропии. Показаны примеры численного расчета распространения и разрушения акустико-гравитационных волн.

"ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧЕ РАДИОЗАТМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ"

М.Е.Горбунов
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва,
michael.gorbunov@zmaw.de

Принцип радиозатменного зондирования заключается в восстановлении атмосферных метеополей по измерениям амплитуд и фаз радиоволн, прошедших через атмосферу. В качестве источника радиоволн используются системы спутниковой навигации, обеспечивающие высокую стабильность частоты. Приемники расположены на низкоорбитальных искусственных спутниках Земли. Интерпретация измеряемых волновых полей является сложной задачей, поскольку требует учета эффектов дифракции и многолучевого распространения. В докладе рассматривается круг методов решения обратной задачи, основанный на использовании представлений волновых полей. В основе этих методов лежит представление о лучевом многообразии в фазовом пространстве. Точками фазового пространства являются лучи. Лучевое многообразие описывает конкретную конфигурацию лучей, формирующих волновое поле. Линейные представления волнового поля описывают проекции лучевого многообразия на различные координатные оси, связанные с исходной системой координат фазового пространства каноническими преобразованиями. Линейные представления реализуются интегральными операторами Фурье. Наличие определенных симметрий позволяет выявить однозначную проекцию лучевого многообразия, свободную от многолучевости. Операция обращения волнового фронта, также реализуемая интегральным оператором Фурье, позволяет в основном устранить эффекты дифракции. Нелинейные (квадратичные) представления волновых полей основаны на использовании квантовых псевдоплотностей Вигнера и Кирквуда. Эти плотности являются функциями в фазовом пространстве, описывающими структуру лучевого многообразия и не требующими априорного знания его однозначной проекции. Эти методы решения обратной задачи позволяют достигать высокой точности и вертикального разрешения при решении обратной задачи зондирования атмосферы.

ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ИДЕЙ А.М. ОБУХОВА О РАССЕЯНИИ И ФЛУКТУАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН В ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЕ

М.А. Каллистратова
Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва,
mkallistratova@gmail.com

(1) В 4-х работах А.М. Обухова были заложены основы теории распространения и рассеяния звуковых и электромагнитных волн в турбулентной атмосфере. На этой теории базируются современные методы дистанционного зондирования атмосферы, развивающиеся во всём мире.

Обухов, 1941: О рассеянии звука в турбулентном потоке. Решено волновое уравнение, содержащее случайные параметры. Вперые введено понятие пространственного спектрального тензора случайного поля скоростей и показано, что поперечное сечение рассеяния звуковой волны пропорционально той спектральной компоненте поля скоростей, пространственная частота которой удовлетворяет условию Брэгга. Сама постановка задачи - вывод "локального" уравнения рассеяния - подразумевала возможность определения спектра турбулентности в выделенном объёме среды.

Обухов, 1953: **О влиянии слабых неоднородностей атмосферы на распространение звука и света.** Показана необходимость учёта дифракционных эффектов при рассмотрении флуктуаций амплитуды волны. Впервые для статистических задач примерён метод "плавных возмущений", разработанный С.М. Рытовым для анализа диффракции света на ультразвуке. Объяснены расхождения экспериментальных результатов В.А. Красильникова с теорией геометрической акустики. Кроме того, показана необходимость примененения волновой теории для расчёта мерцания звёзд.

Красильников и Обухов, 1956: О распространении волн в среде со случайными неоднородностями коэффициента преломления. С единой точки зрения рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты по распространению света и звука в атмосфере. Основываясь на "законе 2/3" Колмогорова-Обухова, показано, что интенсивность флуктуаций определяется единственным параметром турбулентности: структурной характеристикой показателя преломления волн C_n^2. Для оптических волн C_n^2 определяется структурной характеристикой температуры C_T^2, для радиоволн - температуры и влажности, C_T^2 и C_q^2, для звуковых волн - температуры и скорости ветра, C_T^2 и C_V^2.

Обухов, 1960: О структуре температурного поля и поля скоростей в условиях свободной конвекции. Эта статья примыкает к тому же циклу, поскольку в ней получен закон изменения структурной характеристики температуры C_T^2 с высотой в конвективных условиях ("закон -4/3") и показана связь величины C_T^2 с важнейшим для численного прогноза погоды параметром - турбулентным потоком тепла.

(2) В 1956-1980 гг. по инициативе А.М. Обухова в ИФА были проведены обширные экспериментальные исследования, которые подтвердили его идеи, и стимулировали дальнейшее развитие теории распространения волн в работах В.И. Татарского, А.С. Монина и других отечественных и зарубежных исследователей. Из идей А.М. Обухова, который во всех вышеперечисленных работах подчёркивал применимость рассмотренных явлений для изучения турбулентности, выросли современные методы дистанционных атмосферных исследований, такие как акустическая локация нижней тропосферы, радиолокация ясного неба, лазерная сцинтиллометрия.

(3) С начала 1980-х годов в ИФА проводятся дистанционные исследования атмосферного пограничного слоя (АПС).

Содары - доплеровские трёхкомпонентные моностатические акустические локаторы, которые используют обратное рассеяние звука слышимого диапазона - являются самыми простыми и распространёнными во всём мире средствами наземного дистанционного зондирования АПС. Они визуализируют мезомасштабную структуру турбулентности, позволяют различать температурную стратификацию АПС, определять границы приземных и приподнятых инверсий и высоту слоя перемешивания, обнаруживать перемежаемость турбулентности и волновые движения. Содары измеряют в высотном диапазоне от нескольких метров до нескольких сот метров вертикальные профили C_T^2, профили скорости и направления ветра, профили вертикальной компоненты скорости и её дисперсии. Сейчас более десятка зарубежных фирм производят коммерческие содары.

В Радиоакустической лаборатории ИФА было создано несколько поколений исследовательских содаров, которые применялись в Цимлянске, в морских экспедициях, в пустынной и горной местности, на Шицбергене и в Антарктиде. С 2007 г. в режиме непрерывного мониторинга работает экспериментальная сеть содаров, состоящая из 3-х дистанционно-управляемых автономных стационарных измерительных пунктов в Москве и Московской области. Данные измерений ежечасно выкладываются в Интернете.

(4) Некоторые результаты исследований последних лет:

1. Получены статистическине данные о скорости ветра и её изменчивости в воздушном бассейне Москвы [1]. Исследованы а пространственные масштабы конвективных структур в аридной зоне Калмыкии [2]. Определены параметры катабатических ветров над снежной поверхностью Шпицбергена и атлантического побережья Антарктиды [3].

2. Исследована связь параметров низкоуровневых струйных течений (НСТ) со скейлинговыми параметрами приземного слоя, термической стратификацией и геострофическим ветром [4, 5]. Получены климатологические данные о характеристиках НСТ в зимний и летний сезоны в сельской и в урбанизированной местности [6]. Показано влияние городского острова тепла на интенсивность турбулентного перемешивания [6].

3. Разработана методика идентификации волн Кельвина-Гельмгольца (КГВ) на содарных эхограммах и определения их параметров, проведены сопоставления этих параметров с теоретическими оценками. С помощью композтитного анализа выявлена вихревая структура поля ветра в слое волновых движений [7]. Получены статистические данные о повторяемости КГВ, об их параметрах и связи с интенсивностью турбулентности в АПС [8].

4. Проведены испытания широкоапертурных сцинтиллометров на приземных городских трассах. Показано хорошее согласие пространственно-осреднённых значений C_T^2 и потоков тепла, определяемых сцинцилометром, с данными локальных измерений на мачтах [9].

1. Юшков В.П., Кузнецов Р.Д., Каллистратова М.А. **2008:** *Средние профили скорости ветра в воздушном бассейне Москвы*. Метеорология и гидрология, 2008, № 10, 24-33.
2. Гранберг И.Г., Крамар В.Ф., Кузнецов Р.Д., Чхетиани О.Г., Каллистратова М.А., Куличков С.Н. и др. **2009:** *Исследование пространственной структуры атмосферного пограничного слоя сетью доплеровских содаров.* Известия РАН, ФАО, 45, 579-587.
3. Kouznetsov R., Tisler P., Palo T., Vihma T. **2013:** *An evidence of very shallow summertime katabatic flows in Dronning Maud Land*, Antarctica. J. Appl. Meteor. Climatol., **52**, 164–168.
4. Kallistratova M., Kouznetsov R., Kuznetsov D., Kuznetsova I., Nakhaev M., Chirokova G. **2009:** *Summertime low-level jet characteristics measured by sodars over rural and urban areas*. **2009:** Meteor. Zeitschrift, 18, 289-295.
5. Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D., Kramar V.F., Kuznetsov D.D. **2013:** *Profiles of vertical wind speed variance within nocturnal low-level jets observed with a sodar*. J. Atmos. Ocean. Tech. (in print).
6. Kallistratova, M.A. and Kouznetsov R.D. **2012:** *Low-level jets in the Moscow region in summer and winter observed with a sodar network*. - Bound.-Layer Meteor., 143, 159-175.

7. Lyulyukin V., Kouznetsov R., Kallistratova M. **2013:** *The composite shape and structure of braid patterns of Kelvin-Helmholtz billows in a sodar return signal.* J. Atmos. Ocean. Tech. (in print).
8. Lyulyukin V., Kuznetsov D. **2012**: *Features of Kelvin-Helmholtz billows in a stable ABL derived from sodar data*. Ext. Abstr. ISARS2012, 5-8 June 2012, Boulder, Colorado, pp. 150-152.
9. Wood C.R., Gierens R., Kouznetsov R.D., Nordbo A., Järvi L., Kallistratova M.A., Kukkonen J. **2013:** *The structure parameter of temperature over Helsinki from sonic anemometry and scintillometry*. J. Atmos. Ocean. Tech. (in print).

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ДВУХВОЛНОВОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.А. Коршунов, Д.С. Зубачев
“НПО “Тайфун”, Обнинск, korshunov@typhoon.obninsk.ru

Предложена модификация известного метода лидарного определения температуры средней атмосферы по релеевскому рассеянию для случая двухволнового зондирования. Использование дополнительной длины волны позволяет проконтролировать выполнение основного допущения метода о чисто релеевском характере рассеяния, а при определенных априорных предположениях о параметрах аэрозоля дает возможность одновременного определения высотных профилей температуры и отношения обратного рассеяния. С начала 2012 г. выполнена серия измерений температурных профилей в г. Обнинске в диапазоне высот 30-60 км. Для исследования волновых процессов проводилось разделение получаемых температурных профилей на плавно меняющуюся и флуктуирующие части с использованием сглаживающего сплайна. Проведена оценка потенциальной энергии гравитационных волн в зависимости от высоты для различных сезонов. С использованием вейвлет анализа определялись вертикальная длина волны, фазовая скорость и период волновых колебаний.

ПРИЗЕМНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Н.П. Красненко[1,2], В.Н. Абрамочкин[3], Г.В. Бухлова[1], П.Г. Стафеев[1, 2]

[1]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, krasnenko@imces.ru

[2]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

[3]Отделение Секции прикладных проблем при СО РАН

Как известно, дальность приземного распространения звуковых волн в атмосфере от одного и того же источника бывает различной в зависимости от существующих условий распространения звука. Причина этих различий заключается в высокой чувствительности, распространяющегося звукового излучения в атмосфере к значениям таких метеорологических параметров как скорость и направление ветра, температура, влажность воздуха и атмосферное давление, а также к их изменениям с высотой. Существенное влияние на дальность приземного распространения звука также оказывают характеристики турбулентности, подстилающей поверхности, геометрии распространения и самого источника звука.

Обычно при анализе распространения звука рассматривают среднее состояние атмосферы, мало меняющееся на протяжении длины волны. На фоне этого, относительно медленного изменения среды распространения звука, существуют более мелкие и более быстрые изменения её характеристик, называемые турбулентными флуктуациями. Основные характеристики распространения звука в атмосфере определяются средними значениями указанных метеорологических параметров и их изменением с высотой, в то время как их турбулентные флуктуации обычно вызывают вторичные эффекты. К этим эффектам относятся возникновение флуктуаций амплитуды и фазы волны, рассеяние звука, дополнительное ослабление энергии излучения турбулентностью, нарушения когерентности и т.д..

Средние значения перечисленных метеорологических параметров сказываются непосредственно как на абсолютном значении суммарного коэффициента поглощения звука на фиксированной частоте, так и на его частотной зависимости. Поглощение звука (потеря энергии) в атмосфере происходит таким образом, что на большие расстояния могут распространяться только его низкочастотные гармоники. Это явление существенным образом влияет на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) сигнала звукового источника и, следовательно, на разборчивость передаваемой информации.

Другим важным фактором при приземном распространении звука является влияние рефракции. Это явление возникает вследствие изменения с высотой средних значений метеорологических параметров, главным образом, скорости ветра и температуры. Оно может быть рассмотрено на основе метода геометрической акустики. В этом методе используется представление о звуке как о волнах, распространяющихся вдоль лучевых траекторий, кривизна которых определяется изменениями с высотой скорости ветра и температуры и угловыми параметрами, характеризующими начальное направление излучаемого звука. При этом полагается, что энергия звуковой волны не покидает лучевую трубку, сформированную семейством лучей, образующими при их поперечном сечении замкнутую кривую. Поэтому сходимость или расходимость лучей (изменение диаметра лучевой трубки) в геометрической акустике непосредственно влияет на интенсивность звука.

Принято различать три основных режима распространения звука: волноводный, антиволноводный и, как промежуточный, нейтральный режим.

Для нейтрального режима распространения звука в точке приема происходит интерференция прямого (излученного) и отраженного от поверхности земли лучей. Обычно он характерен для относительно небольших расстояний и прямой видимости. Волноводный режим распространения определяется, главным образом, рефракцией на градиентах температуры и скорости ветра, а антиволноводный рассеянием на турбулентных неоднородностях атмосферы.

В случае приземного распространения звука на большие расстояния, прохождение звука в основном определяется рефракцией на градиентах температуры и скорости ветра, результируясь в волноводный или антиволноводный режимы распространения звука. В первом случае, лучи загибаются вниз с многократным переотражением от земли. Относительно малые значения ослабления звука присущи этому режиму распространения звука. В другом случае, лучи загибаются вверх и зона акустической тени возникает около земли на определенном расстоянии от источника. Только очень слабый звук, рассеянный турбулентными неоднородностями в верхних слоях атмосферы, проникает в эту зону.

В докладе описываются алгоритмы для вычисления среднего уровня звукового давления в приземном слое атмосферы, учитывающие влияние метеорологических условий на распространение звука. Приводится описание программного комплекса “Прогноз”, созданного по этим алгоритмам, и предназначенного для оперативной оценки звуковых давлений в слышимом диапазоне частот при удалениях точки наблюдения от источника звука до 10 км.

В проблеме прогнозирования (оценивания) уровня звука, исходными являются четыре группы входных параметров: метеорологические величины, характеристики подстилающей поверхности, звукового источника и трассы распространения. Из метеорологических величин рассматриваются скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, структурные постоянные флуктуаций температуры C_T^2 и скорости ветра C_V^2. Диагностика режима распространения звука базируется на анализе высотного распределения значения и знака градиента фазовой скорости звука.

Программный комплекс прошел испытания в натурных условиях. При проведении экспериментальных исследований использовалась акустическая излучающая система мощностью 1.8 кВт, включающая антенную решетку из 24 рупорных громкоговорителей и шесть усилителей мощности с единым микшерным пультом. Средний уровень излучаемого звука на расстоянии 1 м от апертуры составлял примерно 138–147 дБ в диапазоне частот от 315 Гц до 4 кГц. Вдоль двух приземных трасс распространения длиной до 6 км на различных расстояниях было организовано по три приемных пункта сбора данных о звуковом давлении, измеряемом операторами с помощью шумомеров через октавные фильтры.

Акустический сигнал излучался сериями из 20 импульсов длительностью около 0.5 с с интервалами между ними в 2 с. Такая серия повторялась для каждой частоты от 315 Гц до 4 кГц через терцию. На этом заканчивался один цикл измерений длительностью около 25 минут. Всего было проведено 33 цикла измерений, соответствующих случаю волноводного распространения звука, и 19 циклов измерений, соответствующих случаю попадания операторов в зону акустической тени. В каждом из них были определены средние по 20-ти измерениям значения звукового давления $L_{\text{г}}(f)$ на всех контролируемых частотах f и на различных расстояниях d, а также их дисперсии и доверительные интервалы (с доверительной вероятностью, равной 0.95). Ошибка прогноза $S(f)$ на частоте f оценивалась как разность между вычисленным и измеренным значениями $L_{\text{г}}(f)$.

В целом частотные зависимости вычисленного и измеренного звукового давления в этом диапазоне хорошо согласуются.

В экспериментах было показано, что основным источником ошибок прогноза является неточное задание метеорологической информации. При этом ошибки задания данной информации можно разбить на три группы. Во-первых, существует методическая ошибка, связанная с использованием предположения о горизонтальной однородности метео-

рологических полей в атмосфере. Данная ошибка может быть устранена только путем существенного усложнения используемых алгоритмов. Последнее приведет к недопустимому увеличению времени, необходимого для осуществления прогноза. Кроме того, ее устранение подразумевает наличие мощной измерительной сети, способной осуществить контроль метеорологических параметров вдоль всей трассы распространения звука. Во-вторых, метеорологические данные со станции радиозондирования поступали через относительно большой интервал времени, примерно равный 2 часа. Время сбора информации о звуковых давлениях по одному циклу измерений, указанное выше, также превышало величину, обычно принимаемую за интервал стационарности метеорологических полей. Поэтому при нестабильной метеорологической обстановке, когда средние профили метеорологических параметров сильно меняются во времени, качество прогноза в проведенных экспериментах должно ухудшаться. Наконец, всегда существуют приборные ошибки самих измерительных средств.

При проведении данных экспериментов в основном преобладали стабильные метеорологические условия. Обычно наблюдался ветер с малой дисперсией его направления, примерно равный по абсолютной величине 5-7 м/с на высоте 2 м, и отрицательный градиент температуры порядка 8–10 град/км.

Итоговые результаты экспериментальной оценки качества прогноза уровня звука по частотному диапазону 315–2000 Гц для различных дальностей и режимов распространения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальная оценка качества прогноза уровня звукового давления

Волноводный режим, 33 цикла × 20 импульсов				Антиволноводный режим, 19 циклов × 20 импульсов			
d, м	$\overline{S}$, дБ	P_6	P_i	d, м	$\overline{S}$, дБ	P_6	P_i
3000	+3.2	0.67	0.67	3575	–2.3	0.83	0.78
4500	+2.3	0.67	0.68	4135	–2.3	0.82	0.75
6000	+1.5	0.80	0.74	4800	–1.5	0.82	0.82

Здесь, $\overline{S}$ - средняя ошибка прогноза по всем циклам; P_i – вероятность попадания прогнозируемого давления в доверительный интервал; P_6 – вероятность ошибки прогноза, не превышающей 6 дБ. Учитывая трудности контроля изменчивых метеорологических условий, средние ошибки прогноза в 2–3 дБ являются хорошим результатом.

Оценка прогнозирования уровня звукового давления от удаленного источника продемонстрировала значимость влияния различных атмосферных параметров. В натурных испытаниях была показана достаточно хорошая точность предсказания уровня звукового давления, слышимости и разборчивости речи.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В СЛОИСТОЙ АТМОСФЕРЕ

С.Н. Куличков, И.П. Чунчузов, О.Е. Попов, Г.А. Буш
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, snk@ifaran.ru

Представлены результаты моделирования влияния тонкой структуры атмосферы на характеристики акустических сигналов, распространяющихся в атмосфере на большие расстояния от источников. Предложена численная модель тонкой неоднородной структуры атмосферы в интервале высот z = 20…120 км, используемая для проведения вычислений. Модель и её численные параметры основаны на современных представлениях о формировании тонкой структуры атмосферы внутренними гравитационными волнами. Численные расчеты проводились с использованием метода параболического уравнения. Рассчитывалась пространственная структура акустического поля и структура акустического сигнала на больших расстояниях от импульсного источника. Показано, что наличие тонкой структуры атмосферы приводит к рассеянию акустических сигналов и их регистрации в областях геометрической тени. Анализируется связь параметров сигнала, отраженного от неоднородного слоя (форма, длительность, частотный спектр, интенсивность), с параметрами тонкой слоистой структуры атмосферы на высотах отражения. Предсказываемые теорией формы сигналов, отраженных от слоистых неоднородностей стратосферы и нижней термосферы, сравниваются с типичными наблюдаемыми формами стратосферных и термосферных приходов от наземных взрывов и вулканов в зонах акустической тени. Результаты расчетов формы сигналов находятся в удовлетворительном согласии с данными регистраций сигналов в области геометрической тени.

РАДИОТОМОГРАФИЯ ВОЛН И ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

В.Е. Куницын, Е.С. Андреева, И.А. Нестеров
МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, kunitsyn77@mail.ru

Рассмотрены методы спутникового радиозондирования с применением низкоорбитальных (НО) и высокоорбитальных (ВО) глобальных спутниковых навигационных систем. Существующие НО (типа российской «Цикада» и американской «Транзит») и ВО (GPS/ГЛОНАСС) глобальные спутниковые навигационные системы и сеть наземных приемников дают возможность проводить зондирование ионосферы по различным направлениям и применять методы радиотомографии (РТ), т.е. позволяют восстанавливать пространственную структуру электронной концентрации ионосферы.

В докладе представлены результаты РТ исследований, проведенных при участии авторов, в России, Европе, США и Юго-Восточной Азии. Приведены примеры РТ-сечений ионосферы, иллюстрирующие использование систем НОРТ и ВОРТ в различные периоды гелиогеомагнитной активности. РТ-методы позволяют исследовать разнообразные ионосферные структуры: экваториальную аномалию, провалы ионизации, волновые и квазиволновые структуры, перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), блобы (“blobs”), пятна (“patches”), пузыри (“bubbles”), “языки” ионизации и т.д. Проведены исследования ионосферных возмущений и волн, связанных с естественными источниками, такими как цунами, землетрясения, корпускулярная ионизация. В докладе приводятся также результаты экспериментальных РТ-исследований свойств возмущений плотности плазмы, создаваемых искусственными возмущениями атмосферы при взрывах, стартах ракет, при нагреве мощными КВ радиоволнами. Обсуждаются возможности использования РТ-систем совместно другими методами УФ и радиозондирования.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ

Г.М.Тептин, В.Е. Хуторов, А.А. Журавлев
Казанский федеральный университет, Казань, pri870@yandex.ru

На сегодняшний день атмосферные исследования проводятся в основном в глобальном масштабе, но интерес представляют также масштабы в несколько километров (мезомасштабный). Индикатором неоднородной структуры атмосферы можно считать индекс рефракции радиоволн. Так как индекс рефракции зависит от ряда атмосферных параметров (температуры, давления, влажности, электронной концентрации), то, зная индекс рефракции можно достаточно точно описать процессы, происходящие в тропосфере.

В настоящее время, с развитием технологии спутниковых навигационных систем (СНС) появилась возможность использовать их сигналы для дистанционного зондирования тропосферы и задача оценки влияния мезомасштабных и других неоднородностей в тропосфере на распространение дециметровых радиоволн может быть решена. Это связано с такими преимуществами данной технологии, как наличие плотной сети наземных станций перманентного слежения, круглосуточная запись измерений с высоким временным разрешением, независимость от погодных условий.

В КФУ (г.Казань) на сети приемных станций СНС накоплена уникальная база данных многолетних (2007-2012 гг.) измерений с высокой частотой в единицу времени, которая позволила не только исследовать структуру неоднородностей коэффициента преломления дециметровых радиоволн в тропосфере.

В докладе представлены результаты экспериментального исследования горизонтальных структурных функций тропосферной задержки радиоволн, рассчитанных по данным сети приемников спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, разнесенных на расстояния от 1 до 35 километров в зависимости от высоты (0-10 км) и времени суток. Проводилось сравнение измерений горизонтальных структурных функций в приземном слое по метеоданным и приемников спутниковых систем.

ВЫСОТНЫЕ И МЕЖПОЛУШАРНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ СОЛНЕЧНЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ ФАКТОРОВ

Фахрутдинова А.Н., Гурьянов В.В., Гаврилов А.А., Коротышкин Д.В., Максютин С.В., Магдеев К.А., Гайфуллин И.Р.
Казанский Федеральный Университет, Казань, Antonina.Fahrutdinova@ksu.ru

Исследованы закономерности динамического режима нейтральной атмосферы на высотах 0-100 км: для интервала высот 80-100 км - по радиометеорным измерениям в Казанском Университете, для интервала высот 0-57 км - с привлечением архивных данных Реанализа BADC (UKMO).

Представлена климатическая спектральная модель волновой активности в интервале высот 0-100 км с временными масштабами планетарных волн (2-30 суток) для региона Казани для четырех сезонов года с использованием интегральных вейвлет-спектров, построенных на базе вейвлет Морле. Интервал усреднения составил 16 лет с 1986 года по 2002 гг. Климатическая модель позволила выявить характерные временные масштабы волновых возмущений в зависимости от сезона и высоты: зимой – 5 суток, 16 суток, 27 суток (80-90 км), весной – 5 суток (90-100 км) и 16 суток (80-90 км), летом – 2 и 4 суток, осенью – 5 и 10 суток[1,2].

Были рассчитаны параметры эффективности волновых возмущений с масштабами 1-24 ч (ВГВ и приливы), которые оценивались на основе отношения внутрисуточной дисперсии среднечасовых значений скорости ветра к сумме квадрата скорости ветра и внутрисуточной дисперсии среднечасовых значений скорости ветра. Получено, что динамическая эффективность волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливных волн на высотах 80-110 км примерно в 20 раз выше, чем динамическая эффективность интенсивности волновых движений с масштабами планетарных волн.

На основе сравнения высотных зависимостей амплитуд годовых и полугодовых колебаний фоновой циркуляции и интенсивности волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливов получено новое экспериментальное подтверждение того, что преобладающие движения являются энергетически тесно связанными с волновыми возмущениями с масштабами 1-24 ч, диссипация ВГВ приводит к торможению преобладающего зонального ветра.

На основании анализа данных измерений параметров приливов в нижней термосфере и разработанной численной модели атмосферных приливов был открыт и объяснен эффект дальнего воздействия Антарктического стратосферного озона на термогидродинамические процессы, протекающие в нижней термосфере Северного полушария, в том числе и над регионами РФ[3].

Проведено исследование реакции нейтрального ветра в высотном диапазоне 80-110км, полученного радиометеорным методом в Казани (56N, 49E), на геомагнитные возмущения, вызванные прохождением Земли через границы секторов межпланетного магнитного поля (ММП)[4,5]. Анализ результатов исследования показал следующее:

Для зонального преобладающего ветра в летний и зимний периоды наблюдается его ослабление при усилении уровня геомагнитной возмущенности во всем высотном интервале; для меридиональной компоненты во всем высотном интервале замечено появление составляющей, направленной на север; при возмущенных геомагнитных условиях обнаружен поворот вектора преобладающего ветра против часовой стрелки в осенне-зимний период; летом обнаружен поворот вектора преобладающего ветра по часовой стрелке при возмущенных геомагнитных условиях в интервале высот 90-110км и против часовой стрелки в интервале высот 80-90 км. Для амплитуды и фазы суточного и полусуточного приливов отклик на геомагнитные возмущения менее выражен, чем на преобладающий ветер. Влияние уровня геомагнитной активности на мезомасштабную турбулентность наиболее выражено летом в интервале высот выше 95 км, когда, для возмущенных условий, наблюдается двукратное усиление интенсивности турбулентности на высотах 100–105 км.

Обнаружено влияние интенсивности мезомасштабной турбулентности на Es слои. При высоком уровне турбулентности Es слои отсутствовали, тогда как при ослаблении интенсивности турбулентности выявлена тенденция к появлению интенсивных Es слоев.

Установлены солнечные и геомагнитные факторы, степень влияния которых зависит от природы динамических процессов, сезона и высоты атмосферных слоев.

Установленные высотно-сезонные закономерности по измерениям на сети станций: в Казани, Россия (56N, 49E) радиометеорным методом для высот 80-100км, в Кольме, Германия (52N, 12E) методом LF D1 для высотного уровня около 94 км и в Саскатуне, Канада (52E, 107W) на MF радаре в интервале высот 70-97 км позволили обнаружить долготные различия[6,7]. В зимний период обнаруживаются существенные различия в измерениях на разных станциях как следствие выраженных

возмущений циркуляции зимой и, соответственно, более выраженных долготных различий. Долготные различия интенсивности планетарных волн (2-30 суток) заключаются в следующем: в зимний период замечено превышение интенсивности волновых возмущений в Казани по сравнению с регионами Коллма и Саскатуна, тогда как в летний период интенсивность волновых возмущений приблизительно равна.

Результаты скоординированных исследований показали, что нижняя и средняя атмосфера представляет собой сложную термодинамическую систему с волновыми механизмами взаимосвязи различных высотных слоев и межполушарных взаимодействий.

Полученные результаты важны при разработке международных справочных моделей CIRA, MSIS, численной гидродинамической модели циркуляции и температуры средней атмосферы, а также при составлении прогнозов распространения радиоволн в нейтральной и заряженной атмосфере.

1. Фахрутдинова А.Н. *Волновая структура циркуляции нижней и средней атмосферы Земли* [Текст] // Монография. – Казань: Казанский Государственный Университет, 2006. – 180 с.
2. Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N. *Height and time variability of planetary wave activity* // Advances in Space research, 2009.- V. 43, No. 3.- P. 401-412.
3. Капица А.П., Гаврилов А.А. *Оценка и прогноз дальнего воздействия озона и водяного пара атмосферы Антарктиды на циркуляцию и температуру нижней термосферы над регионами России* //Доклады РАН.-2010.- Т.434, №1. - С. 112-116.
4. Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N., Maksyutin S.V. *The geomagnetic activity influence on the dynamics of the upper mesosphere and lower thermosphere* // int. J. Geomagn. Aeron. – 2001. – V. 2, No 3. – P. 201-208.
5. Maksyutin S.V., Fahrutdinova A.N., Sherstyukov O.N. *Es layer and dynamics of neutral atmosphere during the periods of geomagnetic disturbances* // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2001. – V. 63, No 5. – P. 545-549.
6. Fahrutdinova A.N., Guryanov V.V., Korotyshkin D.V., Manson A.H., Meek C.E., Jacobi Ch., Kurschner D. *Longitudinal variavility of the zonal and meridional circulation and the intensity of planetary waves in the lower and the middle atmosphere* // Adv. Space Res. – 2003. – V. 32, No 9. – P. 1759-1764.
7. Fahrutdinova A.N., Guryanov V.V., Korotyshkin D.V., Manson A.H., Meek C.E., Jacobi Ch., Kurschner D. *Planetary waves activity and rotational effects in the mid-latitudes of the lower and middle atmosphere (0-100 km)* // Adv. Space Res. – 2003. – V. 32, No 5. – P. 869-784.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ РЕФРАКЦИИ

Л. Г. Шаманаева[1], В.В. Белов[1, 2], Ю.Б. Буркатовская[2,3], Н.П. Красненко[4,5], М.В. Тарасенков[1]

[1]Институт оптики атмосферы СО РАН;
[2]Национальный исследовательский Томский государственный университет;
[3]Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
[4]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, krasnenko@imces.ru
[5]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Трудности аналитического подхода к решению задачи о вертикальном распространении звука в пограничном слое атмосферы обуславливают необходимость привлечения численных методов. В [1–9] методом Монте-Карло нами решена задача о распространении монохроматического акустического излучения в плоско-стратифицированной неподвижной турбулентной атмосфере и получены количественные оценки вклада многократно рассеянного излучения. В [10] рассмотрено распространение звука частотой 1000 и 4000 Гц через 500-метровый слой движущейся турбулентной атмосферы с учетом рефракции и получены количественные оценки интенсивности прошедшего и многократно рассеянного излучения для двух значений скорости ветра V = 2 и 4 м/с на высоте флюгера z = 10 м.

В данном докладе приведены количественные оценки влияния рефракции на процесс переноса акустического излучения в модельной движущейся турбулентной атмосфере для звуковых частот 1000, 2000, 3000, и 4000 Гц.

Рефракция звука происходит на градиентах температуры и скорости ветра и приводит к сносу звуковой волны и появлению дополнительного ослабления за счет искривления траектории распространения звукового луча [11, 12]. В дневных условиях, температура обычно уменьшается с высотой, что вызывает соответствующие изменения скорости распространения звука, и траектории распространения звуковых лучей симметрично изгибаются вверх. При увеличении скорости ветра с высотой, траектория распространения звуковых волн в подветренном направлении становится выпуклой, а при распространении в наветренном направлении вогнутой [13]. При этом в [14] отмечено, что величина ослабления звука при его распространении в наветренном направлении может существенно отличаться от ослабления звука при распространении в подветренном направлении, что свидетельствует о необходимо-

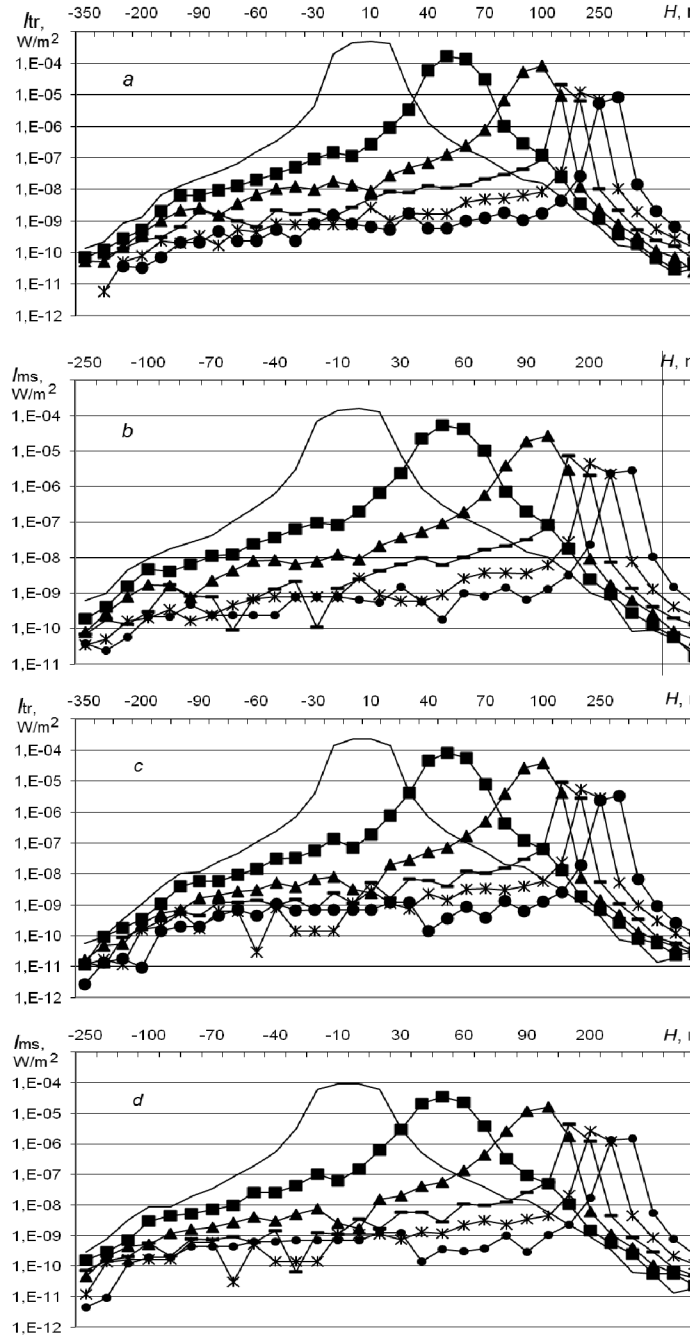

Itr, W/m2
H, m
-350 -200 -90 -60 -30 10 40 70 100 250
1,E-04 1,E-05 1,E-06 1,E-07 1,E-08 1,E-09 1,E-10 1,E-11 1,E-12
a
Ims, W/m2
-250 -100 -70 -40 -10 30 60 90 200
1,E-04 1,E-05 1,E-06 1,E-07 1,E-08 1,E-09 1,E-10 1,E-11
b
Itr, W/m2
-350 -200 -90 -60 -30 10 40 70 100 250
1,E-04 1,E-05 1,E-06 1,E-07 1,E-08 1,E-09 1,E-10 1,E-11 1,E-12
c
Ims, W/m2
-250 -100 -70 -40 -10 30 60 90 200
1,E-04 1,E-05 1,E-06 1,E-07 1,E-08 1,E-09 1,E-10 1,E-11 1,E-12
d

Рис.1.

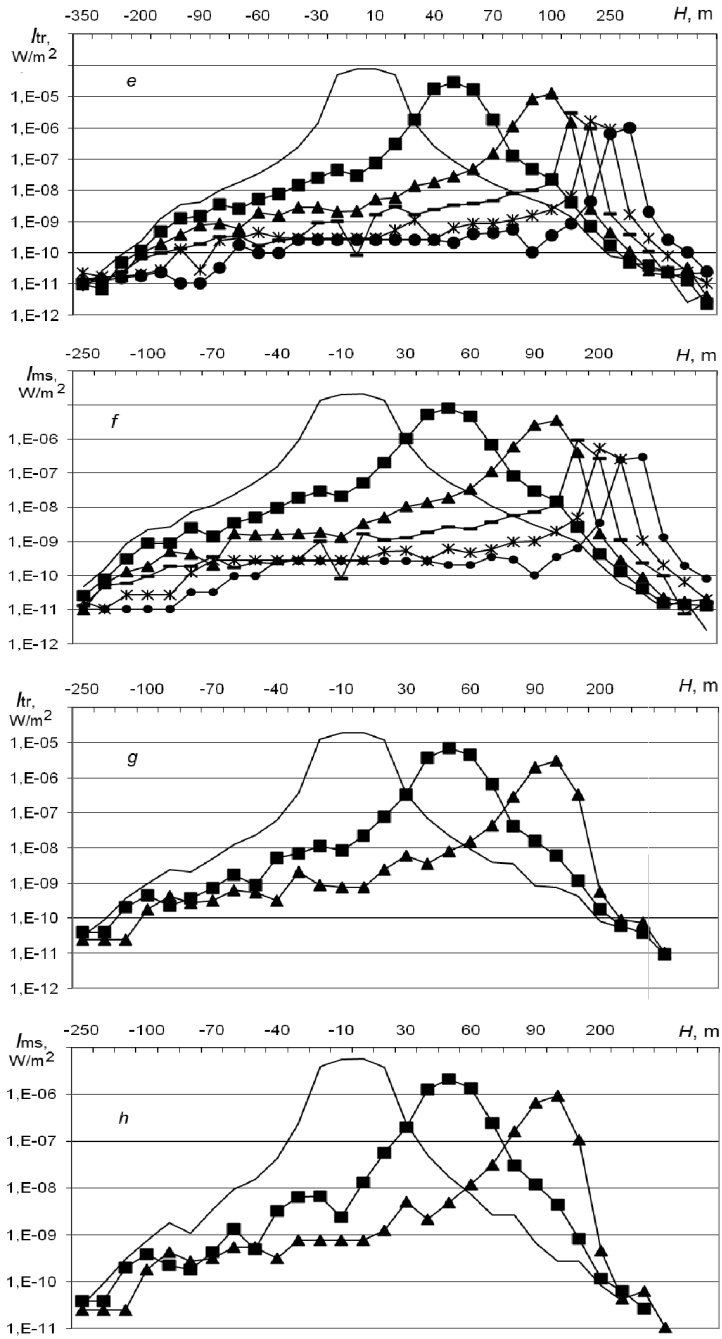


Рис.1. (Окончание)

сти учета влияния рефракционных эффектов при распространении звукового излучения.

Численные эксперименты проведены для следующих исходных условий. Координаты источника звука $x = 0$, $y = 0$, и $z = 35$ м, его акустическая мощность равна 1 Вт, диаметр круговой апертуры 1 м, и угол расходимости излучения источника $\phi = 2{,}5°$. Оценивалось, с учетом симметрии задачи, распределение интенсивности прошедшего и многократно рассеянного излучения по горизонтальной плоскости гипотетического детектора, располагавшегося на высоте 500 м, в зависимости от расстояния H от вертикальной оси в положительном (вдоль ветра) и отрицательном (против ветра) направлениях оси x. Модель атмосферы - 25 слоев высотой 20 м, с постоянными в слоях коэффициентами классического и молекулярного поглощения и рассеяния на флуктуациях температуры и скорости ветра. Подстилающая поверхность моделировалась абсолютно поглощающей. Внешний масштаб турбулентности L_0 задавался в интервале 15–80 м. Вертикальный профиль скорости ветра задавался логарифмическим: $V(z) = (V_* / \varepsilon)\ln(z / z_0)$, где $\varepsilon = 0{,}4$ – постоянная Кармана, V_* – скорость трения, и z_0 – параметр шероховатости поверхности. Расчеты проводились на персональном компьютере для 10^7 фононных историй, что обеспечивало погрешность результатов в области максимума интенсивности в диапазоне 3–10 %. Время счета одного варианта не превышало 10–15 мин.

На рис. 1 представлены статистические оценки распределения интенсивностей прошедшего, I_{tr}, и многократно рассеянного, I_{ms}, излучения по зонам детектора без учета рефракции (сплошные линии) и с учетом рефракции при $F = 1000$ Гц, $L_0 = 80$ м (*a* и *b*); $F = 2000$ Гц, $L_0 = 40$ м (*c* и *d*); $F = 3000$ Гц, $L_0 = 20$ м (*e* и *f*); $F = 4000$ Гц, $L_0 = 15$ м (*g* и *h*) и $V(2$ м$) = 2$ (квадратики), 4 (треугольники), 6 (горизонтальные черточки), 8 (звездочки), и 10 м/с (кружки).

Из рис. 1 видно, что сдвиг максимумов интенсивности прошедшего и многократно рассеянного излучения в направлении ветра пропорционален скорости ветра. Без учета рефракции, максимум интенсивности прошедшего излучения на частоте 1000 Гц $I_{tr\,max} = 5.03 \cdot 10^{-4}$ Вт/м^2, а с учетом рефракции, $I_{tr\,max} = 1.62 \cdot 10^{-4}$ Вт/м^2 для $V(2$ м$) = 2$ м/с, то есть, уменьшается в 3 раза. Вклад многократного рассеяния в интенсивность прошедшего излучения в области максимума составляет 32 %. Ширина распределения также уменьшается, и само распределение становится более асимметричным с увеличением вертикального градиента скорости ветра. Из рис. 4 *c* и *d* видно, что для частоты 4000 Гц без учета реф-

рации, $I_{\mathrm{tr\,max}} = 1.9 \cdot 10^{-5}$ Вт/м^2; при V(2 м) = 2 м/с, $I_{\mathrm{tr\,max}} = 7 \cdot 10^{-6}$ Вт/м^2, то есть, уменьшается в 2,7 раза.

1. Байкалова Р.А., Креков Г.М., Шаманаева Л.Г. Оптика атмосферы и океана. 1988. Т. 1. № 5. С. 25–30.
2. Шаманаева Л.Г., Буркатовская Ю.Б. Известия Вузов. Физика. 2004. № 12. С. 71–76.
3. Shamanaeva L.G., Burkatovskaya Yu.B. Proc. 12th International Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans, P. Anderson, S. Bradley, S. von Hunerbein, eds. Cambridge, UK, 2004. P. 145–148.
4. Shamanaeva L., Burkatovskaya Yu. International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing. Extended Abstracts, S. Emeis, ed. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2006. P. 14–16.
5. Шаманаева Л.Г., Буркатовская Ю.Б. Известия вузов. Физика. 2007. № 10. С. 86–90.
6. Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Известия вузов. Физика. 2009. № 12. С. 14–19.
7. Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Материалы XVI Международного симпозиума “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы.” Томск, 2009. С. 142–146.
8. Belov V.V., Burkatovskaya Yu. B., Krasnenko N.P., Shamanaeva L.G. 15th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing, Paris, France, 2010. http://www.isars2010.uvsq.fr, P. P-RET/01-1–P-RET/01-4.
9. Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 12. С. 1072–1077.
10. Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Известия вузов. Физика. 2011. № 11. С. 100–106.
11. Attenborough K., Li K. M., Horoshenkov K. Predicting outdoor sound. London; New York: Taylor & Frencis. 2007. 441 p.
12. Salomons E. M. Computational acoustic. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishes. 2001. 335 p.
13. Осташев В. Е. Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 206 с.
14. Delany M. E. Acustica. 1977. V. 38. 1977. P. 201–223.

VI. Геофизическая гидродинамика

ВИХРИ И ВОЛНЫ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

Е.Б. Гледзер[1], *О.Г. Чхетиани*[1,2]
[1]Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, lgg@ifaran.ru
[2]Институт космических исследований РАН, Москва

Эксперименты, выполненные в 70-80 гг. в ИФА под руководством А.М.Обухова, используют несколько методов генерации вихрей и волн в однородных вращающихся гидродинамических системах [1,2].

Инерционный метод основан на начальном вращении сосуда и жидкости с последующей остановкой сосуда и развитием в нем системы вихрей. С его помощью в начале 70-х годов экспериментально для эллипсоидов и эллиптических цилиндров был обнаружен новый тип гидродинамической неустойчивости в однородной жидкости - эллиптическая неустойчивость. Через 15 лет эта неустойчивость была переоткрыта с помощью метода протяжки боковых гибких границ эллиптического цилиндра.

Магнитогидродинамический метод использует силу Ампера в слабопроводящей жидкости при наличии системы постоянных магнитов и постоянного электрического тока. Метод использовался для экспериментального моделирования течения Колмогорова и изучения неустойчивости сдвиговых зональных течений в круговой геометрии. В последние годы с помощью МГД генерации исследуются статистические характеристики квазидвумерной турбулентности [3,4].

Метод источников-стоков позволяет промоделировать бета-эффект во вращающемся слое жидкости над наклонными дном в широком канале с образованием зональных встречных потоков и волн Россби [5]. При этом для профилей средней зональной скорости с малой средней по ширине канала относительной угловой скоростью вращения вокруг оси вращения сосуда может происходить почти полная остановка переноса вихрей (баротропное блокирование).

МГД-метод может применяться в конфигурации кольцевого канала с наклонным дном для создания в поле встречных течений циклонов и

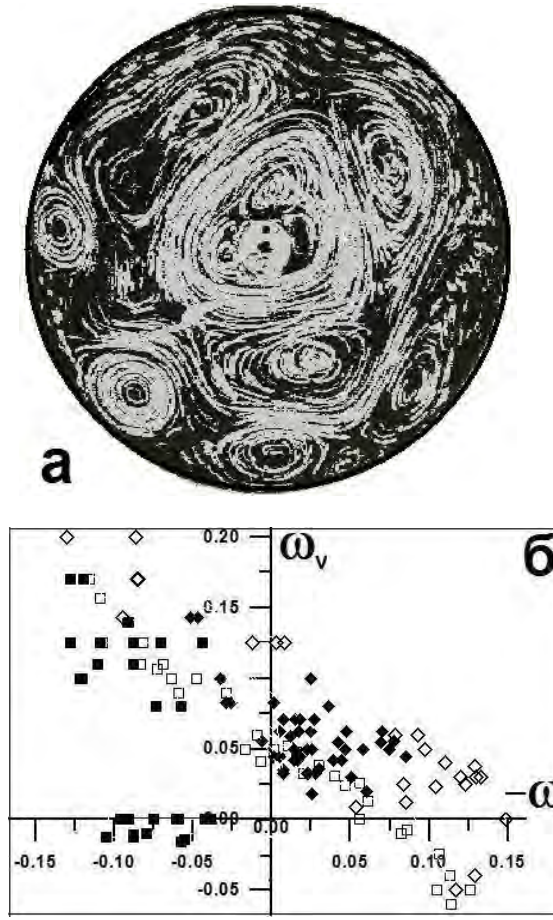


Рис. 1. (**а**): Пример движения пробных частиц при осреднении за период T вращения сосуда в эксперименте с МГД генерацией; в нижней части рисунка вблизи внешней границы -почти неподвижные антициклоны; (**б**): относительная угловая скорость осредненного зонального потока W и относительная угловая скорость переноса вихрей Wv для экспериментов с МГД генерацией (сплошные значки) и с источникам-стоками (открытые значки).

антициклонов на различных расстояниях от центра вращения [6]. Различное расположение магнитных колец и изменение величин магнитного поля и тока дает возможность менять геометрию встречных течений, что приводит к появлению вихрей с отличающимися скоростями движения. В режимах быстрого вращения с тонким слоем жидкости, когда

масштаб Россби-Обухова не превышает характерных размеров сосуда, возникает система возмущений с почти неподвижными антициклонами во внешней части течения и быстро перемещающимися циклонами в основном потоке (рис.1а). На рис.1б показана диаграмма режимов в переменных относительных угловых скоростей осредненного зонального потока W и переноса вихрей вокруг оси вращения системы Wv для экспериментов с МГД генерацией и с источникам-стокам. В отличие от экспериментов с источниками-стоками в МГД генерации вихрей их размеры и азимутальная скорость перемещения могут быть разными в зависимости от расстояния от оси вращения системы. При этом при почти неподвижных антициклонах вблизи внешней границы сосуда движение циклонов в его середине и у его внутренней границы происходит с большой угловой скоростью.

1. Е.Б.Гледзер,Ф.В.Должанский,А.М.Обухов, Системы гидродинамического типа и их применение. М.:Наука,1981.
2. Ф.В.Должанский, Основы геофизической гидродинамики. Физматлит. 2011.
3. А.Е.Гледзер,Е.Б.Гледзер,А.А.Хапаев,О.Г.Чхетиани, ЖЭТФ 140 590 (2011).
4. С.И.Кострыкин, А.А.Хапаев, И.Г.Якушкин, Письма в ЖЭТФ 95 583 (2012).
5. А.Е.Гледзер,Е.Б.Гледзер,А.А.Хапаев,Ю.Л.Черноусько, ДАН 444, 309 (2012).
6. А.Е.Гледзер,Е.Б.Гледзер,А.А.Хапаев,О.Г.Чхетиани, Письма в ЖЭТФ 97 (6) (2013).

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

В. А. Довженко
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, va@dovzhenko.info

Хорошо известно, что решение Навье-Стокса при умеренных числах Рейнольдса можно решать спектральным методом Бубнова-Галёркина, если известна базовая система собственных функций соответствующей краевой задачи Стокса при нулевых граничных условиях для скорости. Для прямоугольной области, то есть в двумерной постановке, эту задачу удалось решить численно лишь в работе (1), опубликованной в 2003 году. В 2011 году была опубликована статья автора (2), в которой решение было получено спектральным методом. В ней для нахождения искомых базовых собственных функций был применён метод разложения по собственным функциям линейной задачи

$$\left\{\begin{array}{l} \Delta\Delta\Omega_K - h_K^4\cdot\Omega_K = 0,\quad \Omega_K = -\Delta\Psi_K,\quad \mathbf{V}_K = \left\{\frac{\partial\Psi_K}{\partial y}, -\frac{\partial\Psi_K}{\partial x}\right\} \\ [\Psi_K]_s = 0,\qquad [\mathbf{V}_K]_s = 0,\qquad \left[\Omega_K\cdot\frac{\partial\Delta\Omega_K}{\partial \mathbf{n}} - \Delta\Omega_K\cdot\frac{\partial\Omega_K}{\partial \mathbf{n}}\right]_s = 0,\quad \int\limits_D (\mathbf{V}_K\cdot\mathbf{V}_K)\,d\mathbf{x} = 1, \\ \text{в области } \mathbf{D}\in\left\{-\frac{L_x}{2}\le x\le\frac{L_x}{2}, -\frac{L_y}{2}\le y\le\frac{L_y}{2}\right\} \text{ с границей } \mathbf{S}. \end{array}\right\} \quad (1)$$

Граничное условие для обеспечивает положительность собственных значений h_K^4. Ортонормированные решения этой задачи имеют вид $\Psi_K(x,y) = N_K\cdot X_K(x)\cdot Y_K(y)$, где $X_K(x) = \begin{Bmatrix} X_K^C \\ X_K^S \end{Bmatrix}$, $Y_K(y) = \begin{Bmatrix} Y_K^C \\ Y_K^S \end{Bmatrix}$, N_K удовлетворяют условию энергетической нормировки на единицу.

$$X_K^C(x) = \left(\frac{\cos f_K x}{\cos\frac{f_K L_x}{2}} - \frac{\operatorname{ch} g_K x}{\operatorname{ch}\frac{g_K L_x}{2}}\right),\ g_K \operatorname{th}\frac{g_K L_x}{2} + f_K \operatorname{tg}\frac{f_K L_x}{2} = 0;$$

$$X_K^S(x) = \left(\frac{\operatorname{sh} g_K x}{\operatorname{sh}\frac{g_K L_x}{2}} - \frac{\sin f_K x}{\sin\frac{f_K L_x}{2}}\right), f_K \operatorname{th}\frac{g_K L_x}{2} - g_K \operatorname{tg}\frac{f_K L_x}{2} = 0;$$

$$Y_K^C(y) = \left(\frac{\cos g_K y}{\cos\frac{g_K L_y}{2}} - \frac{\operatorname{ch} f_K y}{\operatorname{ch}\frac{f_K L_y}{2}}\right), f_K \operatorname{th}\frac{f_K L_y}{2} + g_K \operatorname{tg}\frac{g_K L_y}{2} = 0;$$

$$Y_K^S(y) = \left(\frac{\operatorname{sh} f_K y}{\operatorname{sh}\frac{f_K L_y}{2}} - \frac{\sin g_K y}{\sin\frac{g_K L_y}{2}}\right), g_K \operatorname{th}\frac{f_K L_y}{2} - f_K \operatorname{tg}\frac{f_K y}{2} = 0,$$

f_K *и* g_K – положительные корни системы дисперсионных уравнений. Вся система решений разбивается на четыре группы, отвечающие двум типам симметрии каждой из функций X_K и Y_K

$$\Psi_K^{CC} = N_K^{CC}\cdot X_K^{CC}(x)\cdot Y_K^{CC}(y),\qquad \Psi_K^{CS} = N_K^{CS}\cdot X_K^{CS}(x)\cdot Y_K^{CS}(y),$$
$$\Psi_K^{SC} = N_K^{SC}\cdot X_K^{SC}(x)\cdot Y_K^{SC}(y),\qquad \Psi_K^{SS} = N_K^{SS}\cdot X_K^{SS}(x)\cdot Y_K^{SS}(y).$$

Индексы C и S указывают на тип симметрии по каждой из координат. **Гиперболические добавки в функции тока формируют погранслой, зависящий не от числа Рейнольдса, как в уравнении Навье-Стокса, а от периодичности течения в перпендикулярном направлении.** Базисные функции Ψ_{mn}, являющиеся решениями задачи (1), показаны на рис. 1.

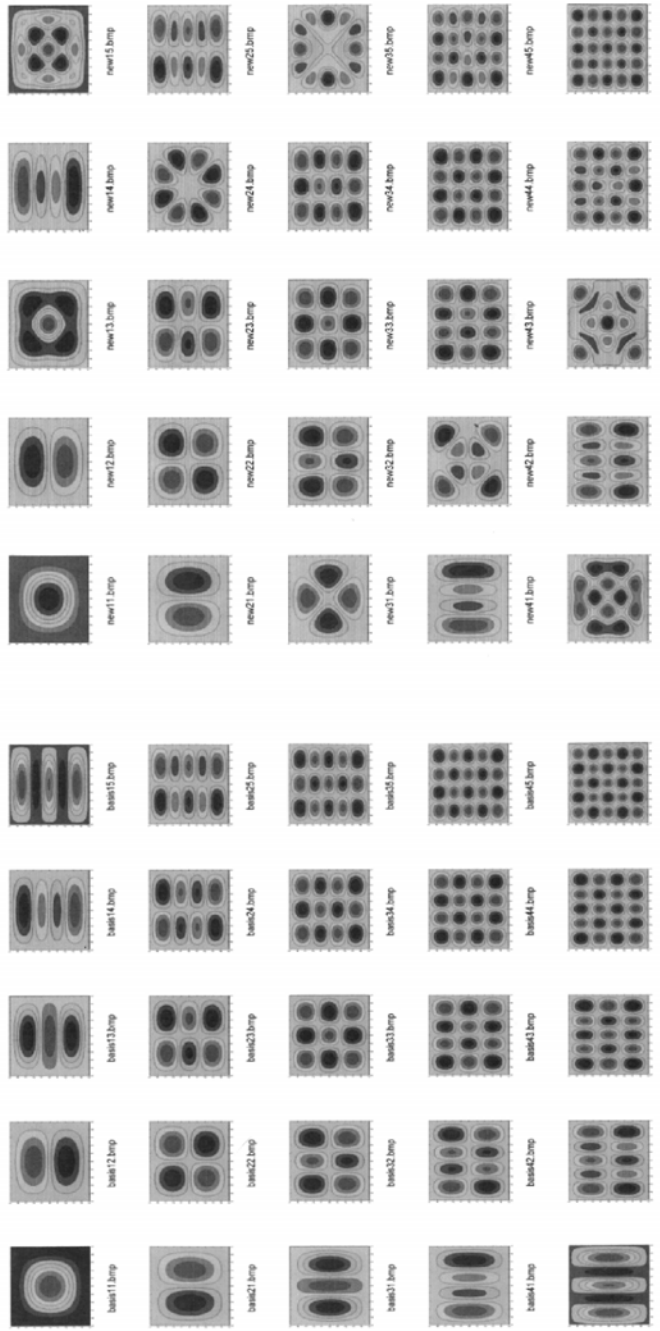

basis11.bmp
basis12.bmp
basis13.bmp
basis14.bmp
basis15.bmp
basis21.bmp
basis22.bmp
basis23.bmp
basis24.bmp
basis25.bmp
basis31.bmp
basis32.bmp
basis33.bmp
basis34.bmp
basis35.bmp
basis41.bmp
basis42.bmp
basis43.bmp
basis44.bmp
basis45.bmp
basis51.bmp
basis52.bmp
basis53.bmp
basis54.bmp
basis55.bmp
new11.bmp
new12.bmp
new13.bmp
new14.bmp
new15.bmp
new21.bmp
new22.bmp
new23.bmp
new24.bmp
new25.bmp
new31.bmp
new32.bmp
new33.bmp
new34.bmp
new35.bmp
new41.bmp
new42.bmp
new43.bmp
new44.bmp
new45.bmp
new51.bmp
new52.bmp
new53.bmp
new54.bmp
new55.bmp

Рис. 1

Рис. 2

Краевая задача Стокса $\Delta \mathbf{V} + \lambda \cdot \mathbf{V} = \nabla \Pi,\ \operatorname{div} \mathbf{V} = 0,\ [\mathbf{V}]_s = 0$

в случае прямоугольника сводится к задаче для вихря

$$\Delta\Omega + \eta \cdot \Omega = 0, \quad \Omega = -\Delta\Psi, \quad [\Psi]_s = \left[\frac{\partial\Psi}{\partial x}\right]_s = \left[\frac{\partial\Psi}{\partial y}\right]_s = 0. \qquad (2)$$

Представив решения $\Psi_L(x,y)$ задачи (2) в виде ряда

$$\Psi_L(x,y) = \sum_K A_K(L) \cdot \Psi_K(x,y),$$

получаем для каждого L систему однородных уравнений

$$\sum_K J_{K,K'} \cdot A_K(L) - \eta_L \cdot A_{K'}(L) = 0,$$

где индекс K' определяет номер уравнения, индекс K определяет порядковый номер слагаемого в каждом уравнении, а индекс L помечает набор собственных чисел и собственных векторов симметричной матрицы $J_{K,K'} = \int \Omega_K(x,y) \cdot \Omega_{K'}(x,y)\, dx$. Из всех элементов $J_{K,K'}$ отличны от нуля только те, в которых типы симметрии для $\Omega_K(x,y)$ и $\Omega_{K'}(x,y)$ совпадают по обеим координатам. Поэтому система функций Ψ_L, как и система Ψ_K, расщепляется на подсистемы $\Psi_L^{CC}, \Psi_L^{CS}, \Psi_L^{SC}, \Psi_L^{SS}$.

Показанные на рис.2 функции Ψ_L, могут иметь гораздо более сложную структур, чем функции Ψ_K, показанные на рис.1. Впервые это было отмечено в $[1]$. Собственные значения в $[1]$ и в $[2]$

λ	λ_1	$\lambda_{2,3}$	λ_4	λ_5	λ_6	$\lambda_{7,8}$	$\lambda_{9,10}$
[1]	52.33	92.09	128.16	154.03	166.90	189.46	246.05
[2]	52.39	92.16	128.30	154.18	167.28	189.69	246.44

очень неплохо совпадают друг с другом. В случаях, когда корни одиночные, вид функций тока одинаков. Когда корни сдвоенные, функции тока $\Psi_L^{[1]}$ и $\Psi_L^{[2]}$ отличаются, причём в формировании функций $\Psi_L^{[2]}$ участвуют только функции Ψ_L^{CS} или Ψ_L^{SC}. Напротив, в формировании функций $\Psi_L^{[1]}$, видимо, участвуют функции Ψ_L^{CS} и Ψ_L^{SC} совместно. При $L_x \neq L_y$ этот парадокс должен исчезнуть, но исследование этого эф-

фекта является вопросом будущего времени. Отметим также, что в работе [2] вычислялись не корни λ_L, а связанные с ними корни $\zeta_L = \frac{\lambda_L}{4\pi^2}$!.

Литература

1. А.А. Иванчиков. *Численное решение некоторых спектральных задач для уравнения Стокса*. Вычисленные методы и программирование. 2003. Т. 4, стр. 227-243.
2. В.А. Довженко. *О решении уравнения для вязкой несжимаемой жидкости в прямоугольной области при малых Рейнольдса*. Известия АН СССР, ФАО, 2011, Том 47, № 2, с.230-248.

ТРЁХМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЛАБОРАТОРНОМ ТЕЧЕНИИ КОЛМОГОРОВА

В. А. Довженко
Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, va@dovzhenko.info

В работе в линейном приближении исследуется потеря устойчивости лабораторного течения Колмогорова, ограниченного снизу и сверху двумя плоскостями, на которых удовлетворяется условие прилипания. Задача решена методом Бубнова-Галёркина при учёте как двумерных, так и трёхмерных возмущений. Течение со свободной поверхностью рассматривается как частный случай общей теории.

Для тонких слоёв жидкости подтверждена справедливость квазидвумерного приближения Должанского и продемонстрирована возможность его последовательного уточнения методом Пономарёва. Это позволило согласовать теорию с экспериментом в пределах нескольких процентов.

В этих же условиях дополнительно обнаружена неустойчивость этих течений по отношению к трёхмерным возмущениям, причём соответствующие критические числа Рейнольдса существенно ниже, чем у хорошо известной квазидвумерной неустойчивости. Автор полагает, что именно возбуждение таких трёхмерных возмущений отвечает за неравномерное распределение (кластеризацию) частиц визуализатора в "докритическом" режиме течения жидкости. В случае, когда течение ограничено и снизу, и сверху, неустойчивость возникает моментально при включении действующей внешней силы и существует при любом малом числе Рейнольдса. Во всяком случае, автору за многие годы так и не удалось найти этот порог. Наличие этой неустойчивости обеспечивает возможность ярко видеть "полосатую" картинку в "докритическом" режиме течения Колмогорова.

В течении со свободной поверхностью кластеризация примеси происходит постепенно и настолько медленно, что её приходиться ждать. Обычно это не делают, так как по мере увеличения числа Рейнольдса этот процесс ускоряется и довольно быстро устанавливается картина в виде длинных "колбасок". Этот режим, который мы до сих пор считали стационарным докритическом режимом, оказался метастабильным. Он до сих пор не проявлялся в реальном эксперименте и при демонстрациях, так как всё внимание обычно было сосредоточено на закритичном режиме, где формируется хорошо известная "паркетная" картина вихрей. Но оказалось, что если оставить установку в докритическом режиме на один-два часа и более, вихри начинаются перестраиваться и картина начинает напоминать вложенные друг в друга клинья. Чёткость этой картинки увеличивается по мере уменьшения глубины слоя свободной жидкости.

Теоретическое осмысление открытого эффекта требует разработки трёхмерной нелинейной теории течения вязкой несжимаемой жидкости в параллепипеде, которая пока отсутствует, но разрабатывается автором. Главная трудность состоит в выполнении условия прилипания к стенкам параллепипеда.

Литература

1. Е.Б.Гледзер, Ф.В.Должанский, А.М.Обухов. *Системы гидродинамического типа и их применение* .- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1981. – 368 с.

TOPOGRAPHIC 3D VORTICES OVER SUBMARINE OBSTACLE

Zyryanov V.N.[1], *Ryzhov E.A.*[2] *and Koshel K.V.*[2,3]
[1] Institute of Waters Problems of RAS, Moscow, zyryanov@aqua.laser.ru
[2] V.I.Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok
kvkoshel@poi.dvo.ru, ryzhovea@poi.dvo.ru
[3] Far Eastern Federal University, Vladivostok

We formulate a model for vertical mixing in topographic vortices over submerged isolated obstacles in the ocean. Usually topographic vortices are considered in the frame of the quasi-geostrophic approximation, i.e. the vortices' vertical velocities are supposed to be infinitesimal (of Rossby number order). Natural observations, however, suggest that in the vicinity of topographic vortices there is an intense vertical mixing [1]. This mixing can occur only due to finite vertical velocities existing in the vicinity of topographic vortices.

A mathematical model for the finite vertical velocity was introduced in recent papers [2]. It was shown, specifically, that a topographic vortex may become instable, that results in the generation of secondary vorticity in the form of horizontal vortical tori (an analogue to Taylor vortices between two rotating cylinders). This model, however, was introduced for a peculiar obstacle form, namely, two cylinders being located one over the other. Also the model needs two Stewartson's layers [3], arising over the cylinders' edges. The present paper deals with these flaws and shows the vortical tori can arise over a submerged cylinder.

The quasi-geostrophic tangential velocity field generated by a submerged cylinder with height h_0 and radius r_1 on the f - plane [3], has the form $V_0(r) = -\frac{\sigma}{2}\begin{cases} h_0 r, & r \le r_1; \\ \frac{h_0 r_1^2}{r}, & r \ge r_1. \end{cases}$, where $\sigma = h_0 / \left(H \cdot Ro\right)$ is the topographic parameter, H is the mean depth, $Ro \sim U_0 / \left(fL\right)$ is the Rossby number. Then, we consider a 3D velocity field of the form $\mathbf{U} = (u_r, V_0(r) + u_\theta, u_z)$. Substituting this field into the full hydrodynamics equations, we obtain, in the linear approximation, a boundary value problem for velocity perturbations $\vec{V}(r,z) = (u_r, u_\theta, u_z)$

$$\frac{d^2}{dr^2}\vec{\mathbf{V}}(r;L) - \mathbf{K}^2(r;\lambda)\vec{\mathbf{V}}(r;L) = \vec{\mathbf{0}}, \quad \mathbf{K}^2(r) = \left(\frac{3}{4r^2} + \alpha^2\right)\mathbf{E} + \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \lambda^2 Q(r) & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{where} \quad \begin{aligned} u_r &= V_2(r)\cos\alpha z / \left(\lambda\, g(r)\sqrt{r}\right), \\ u_\theta &= \cos\alpha z V_1(r) / \sqrt{r}, \\ u_z &= -\frac{\sin\alpha z}{\alpha\lambda r\, g(r)}\frac{d}{dr}[\sqrt{r}V_2(r)], \end{aligned}$$

$$Q(r) = \alpha^2 \begin{cases} \left(-\sigma h_1 + f\right)^2, & 0 < r < r_1; \\ \left(-\sigma h_1 \frac{r_1^2}{r^2} + f\right) f, & r_1 < r < \infty. \end{cases} \quad (2)$$

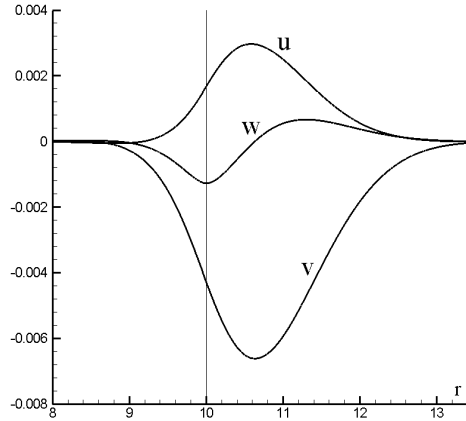
Spectral parameter $\lambda = 1/E$ is the inverse Ekman number, and α is the parameter determining the periodicity if the vertical velocity.

The formulated problem resembles the relations for the Taylor-Couette flow [2]. However, as opposed to paper [2], instead of the null boundary

conditions on the cylinders' edges, we set nonincreasing conditions at the cylinder's center and at the infinity

$$\left(\frac{d}{dr}\vec{\mathbf{V}}(r;L)+\mathbf{A}_{\substack{0\\ \infty}}(L_0)\vec{\mathbf{V}}(r;L)\right)\Bigg|_{\substack{r\to L_0\to 0\\ r\to L\to\infty}}=\mathbf{0} \qquad (3)$$

If matrix $\mathbf{K}(r)$ has at least a pair of pure imaginary eigenvalues within an interval, (r_1^*, r_2^*), boundary value problem (1),(3) has a discrete eigenvalues spectrum [4]. The eigenvalues of the matrix have the form, $\mu^2=\frac{3}{4r^2}+\alpha^2+\left(\lambda^2 Q(r)\right)^{1/3}$, then, the condition for existence of a pair of pure imaginary eigenvalues reads $Q(r)<0$ or $f<\sigma h_1 r_1^2 / r_2^{*2}$.



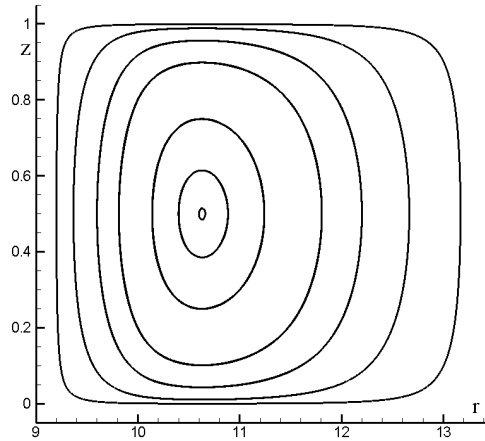


Fig. 1: (a) Eigenfunctions $u(r), v(r), w(r)$ of problem for a submerged cylinder. The vertical line is the cylinder's edge. The problem's parameters are $r=10$, $h=0.15$, $f=1$, $Ro=0.09$, $\sigma=5$, $\alpha=\pi$. (b) A Poincaré section on plane (r,z) for the resulting toroidal vortex.

We solved this boundary problem employing the invariant imbedding method, and found that, in the vicinity of a cylindrical topographic vortex, there arises a toroidal vortex, whose core extends significantly over the cylinder's edge. Figure 1a shows the obtained solution of the eigenfunctions, while fig. 1b depicts the resulting toroidal vortex.

The reported study was partially supported by RFBR, research projects: 13-05-00131, 12-05-31011.

References

1 P.G. Baines, D.L. Boyer and B. Xie, *Dyn. Atmos. Oceans.* **39**, 153-173 (2005).
2 V.N. Zyryanov, *J. Mar. Res.* **69**, 463-481 (2011).
3 K. Stewartson, *J. Fluid Mech.* **30**, 357-369 (1967).
4 M.V. Fedoruk, Asymptotic methods for linear ordinary differential equations, Nauka, Moscow (1983).

ЦИКЛОСТРОФИЧЕСКОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЗАКРУЧЕННЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

М.В. Калашник, К.Н. Вишератин.
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва
"НПО "Тайфун", Обнинск, kalashnik-obn@mail.ru

В классической работе А.М. Обухова (1949) был изучен процесс приспособления движений вращающейся атмосферы к состояниям геострофического баланса – баланса между градиентом давления и силой Кориолиса. В настоящей работе исследован процесс приспособления закрученных газовых потоков к состояниям циклострофического баланса - баланса между градиентом давления и центробежной силой. Данный процесс, сопровождающийся интенсивными акустическими колебаниями, происходит в интенсивных атмосферных вихрях (смерчах, торнадо) и разнообразных газодинамических устройствах (трубках Ранка, вихревых камерах).

В теоретическом исследовании рассматриваются изэнтропические течения идеального политропного газа. В цилиндрических координатах безразмерная система уравнений динамики имеет вид

$$\frac{du}{dt}-\frac{\mathrm{v}^2}{r}+\frac{M^{-2}}{\gamma-1}\frac{\partial\rho^{\gamma-1}}{\partial r}=0,\ \frac{d\mathrm{v}}{dt}+\frac{u\mathrm{v}}{r}=0,$$

$$\frac{dw}{dt}+\frac{M^{-2}}{\gamma-1}\frac{\partial\rho^{\gamma-1}}{\partial z}=0,\ \frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru\rho)+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0\,. \quad (1)$$

Здесь $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial r + w\partial/\partial z$, u, v, w – соответственно радиальная, тангенциальная и осевая компоненты скорости, ρ - плотность, $\gamma = c_p / c_v$ – отношение теплоемкостей, $M = \mathrm{V}/c$ - число Маха, c - скорость звука. Безразмерные температура и давление определяются соотношениями $T = \rho^{\gamma-1}$, $P = \rho^{\gamma}$. В качестве масштабов переменных r, t, ρ и компонент скорости приняты соответственно $L, L/\mathrm{V}, \rho_0, \mathrm{V}$, где V, L – характерные значения скорости и ее горизонтального масштаба.

Состояние циклострофического баланса описывается стационарным решением системы (1): $u = w = 0$,

$$\frac{\mathrm{v}^2}{r} = \frac{M^{-2}}{\gamma-1}\frac{\partial \rho^{\gamma-1}}{\partial r} \qquad (2)$$

Для изучения процесса приспособления к этому состоянию рассмотрена начальная задача, отвечающая ситуации, когда в газе, находящемся при постоянных давлении и плотности, мгновенно создан вихрь с заданной тангенциальной скоростью. Как и в теории А.М. Обухова, решение задачи представлено суммой стационарного (сбалансированного) и волнового (акустического) компонентов [1]. Показано, что при интенсивном начальном вращении установление сбалансированного состояния сопровождается резким падением приосевой температуры. С этой особенностью может быть связано одно из объяснений вихревого эффекта Ранка - интенсивного охлаждения приосевой зоны закрученного газового потока.

Для описания нелинейных акустических колебаний в ядре осесимметричного вихря в работе построен класс точных решений системы (1) с линейной зависимостью от координат для компонент скорости. Решения данного класса, обобщающие решения [2], описываются выражениями

$$u = R'(t) r_0 \ , \ w = Z'(t) z_0 \ , \ \mathrm{v} = R(t)^{-1} r_0$$

$$\rho = R(t)^{-2} Z(t)^{-1} \left(1 + 0.5 M^2 (\gamma-1)(b^2 r_0^2 - a^2 z_0^2)\right)^{1/(\gamma-1)},$$

где $r_0 = r/R(t)$, $z_0 = z/Z(t)$ и функции $R(t), Z(t)$ удовлетворяют системе уравнений

$$R'' - \frac{1}{R^3} + \frac{b^2}{R^{2\gamma-1} Z^{\gamma-1}} = 0, \qquad Z'' - \frac{a^2}{R^{2\gamma-2} Z^{\gamma}} = 0 \ . \qquad (3)$$

Входящие в (3) параметры a, b характеризуют соответственно величину осевого и радиального градиентов давления. При $a = 0$ стационарное решение системы (3) $Z \equiv 1$,
$R = R_* = b^{1/(\gamma-2)}$ отвечает состоянию циклострофического баланса.

На основе качественного анализа системы (3) нами изучены нелинейные акустические колебания в окрестности сбалансированного состояния. Показано, что колебательный режим реализуется только при $\gamma < 2$ и $a = 0$. При небольших отклонениях от состояния баланса частота колебаний пропорциональна угловой скорости вращения ядра: $\omega = \sqrt{4 - 2\gamma}(V / L)$. При характерных для атмосферных смерчей значениях $L = 100$ м, $V = 100$ м/с частота (в герцах) $\omega = 0.175$Гц (инфразвук). Для параметров закрученных потоков в трубках Ранка $\omega = 1450$Гц. Акустические колебания с близкими частотами регистрируются измерениями.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-08-97510-р_центр_а).

1. Калашник М.В., Вишератин К.Н. *Циклострофическое приспособление в закрученных газовых потоках и вихревой эффект Ранка* //Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2008. Т. 133, № 4. С. 935-947.
2. Калашник М.В., Вишератин К. *Циклострофическое приспособление и нелинейные колебания в ядре интенсивного атмосферного вихря* // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 638-644.

О ЗАТУХАНИИ ТЕЧЕНИЯ В ТОНКОМ СЛОЕ ВЯЗКОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Кострыкин[1,2] *С.В., Якушкин*[1] *И.Г.*
[1]Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва
[2]Институт вычислительной математики РАН, Москва, s_kostr@mail.ru

Рассматривается задача о затухании течения в тонком слое вязкой вращающейся жидкости. При этом течение жидкости перед затуханием является вынужденным и стационарным. Для теоретического анализа используется модель кармановского типа с предписанной асимметрией течения. Численное моделирование задачи проводится для различного набора параметров — скорости вращения основания, величины вынуждающей силы, начального состояния системы. В результате показывается, что на начальной стадии, при медленном вращении, затухание течения жидкости удовлетворяет степенному закону, после интервала

времени соответствующему характерному времени диффузии, система переходит в режим с экспоненциальным затуханием. Также для указанной системы найдены два различных стационарных режима. Первый из них описывает твердотельное вращение жидкости, а второй соответствует поверхностному слою с антициклональным вращением и погранслоем на вращающейся границе. Показывается, что переход системы в конкретный режим зависит от начального состояния системы, а также от значений параметров модели. Полученные численные результаты используются для интерпретации данных лабораторных экспериментов.

СВЯЗЬ МЕЖДУ СПИРАЛЬНОСТЬЮ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ ВИХРЕМ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

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

Обсуждается – в том числе в историческом аспекте – общая связь между понятиями спиральности поля скорости и потенциального вихрем Эртеля для вращающейся, сжимаемой, бароклинной жидкости. Анализируются случаи вихревого движения как однокомпонентной среды (сухой воздух), так и среды двухкомпонентной (влажный воздух, запыленный сухой воздух, морская вода). Показано принципиальное различие между этими двумя средами в смысле временной эволюции (динамики) спиральности. Приводится запись уравнений движения одно- и двухкомпонентных бароклинных жидкостей в форме Намбу (обобщающей Гамильтонов формализм в гидродинамике), что позволяет дать альтернативный вывод общего соотношения между спиральностью и потенциальным вихрем.

ЧИСЛЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА

Г.В. Левина[1,2], М.Т. Монтгомери[3,4]
[1] Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,
[2] Институт космических исследований РАН, Москва,
galchonok2002@yahoo.co.uk
[3]Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA
[4]NOAA/Hurricane Research Division, Miami, Florida, USA

В наших работах 2009-2012 гг. был развит и применен численный подход для анализа спиральности поля скорости при изучении

тропических циклонов, что было предпринято впервые в мировой практике.

Основным источником энергии для тропических циклонов являются конвективные движения, осуществляющие перенос явного и скрытого тепла от подстилающей поверхности океана. В работе [1] был предложен новый сценарий формирования тропического циклона, основанный на самоорганизации конвективных процессов в тропической атмосфере при благоприятствующих циклогенезу кинематических и термодинамических условиях в окружающей среде, и иллюстрирован прямым численным моделированием с помощью региональной модели атмосферы RAMS с высоким пространственным разрешением (2-3 км по горизонтальным направлениям). С использованием данных почти-облачно-разрешающего моделирования [1] авторами [2] были выполнены расчеты и анализ спиральных характеристик поля скорости развивающегося ураганного вихря, показавшие, что образование тропического циклона сопровождается генерацией существенно ненулевой и нарастающей интегральной спиральности вихревой системы, означающей нарушение зеркальной симметрии атмосферной турбулентности. Дальнейшие исследования позволили предложить «спиральный» сценарий зарождения и усиления тропических циклонов [3]. Сценарий основан на особых свойствах спиральной турбулентности, в которой за счет подавления потока энергии к масштабам диссипации, существуют благоприятные условия для возникновения крупномасштабной вихревой неустойчивости.

Анализ процессов генерации завихренности и спиральности на масштабах кучевой облачности и системы в целом показал ключевую роль облачных вихревых структур (Vortical Hot Towers), в существовании тропического циклона как целостной крупномасштабной спиральной вихревой системы на разных этапах его эволюции [4,5]. Вихревые башни осуществляют зацепление крупномасштабной тангенциальной и вертикальной циркуляции. В момент времени, когда происходит такое зацепление, зарождающийся вихрь становится энергетически самоподдерживающимся. В настоящем докладе на примере серии численных атмосферных экспериментов из работы [1] обсуждается, как практически может быть реализована ранняя диагностика зарождения тропического циклона с помощью количественного анализа интегральных характеристик энергии и спиральности и набора соответствующих гидро- и термодинамических полей.

1. Montgomery M.T., Nicholls M.E., Cram T.A., Saunders A.B. *A vortical hot tower route to tropical cyclogenesis*. J. Atmos. Sci., 2006, v. 63, p. 355-386.
2. Г.В. Левина, М.Т. Монтгомери. *О первом исследовании спиральной природы тропического циклогенеза*. Доклады Академии наук. 2010, т. 434, N 3, с. 401-406.

3. G.V. Levina, M.T. Montgomery. *Helical scenario of tropical cyclone genesis and intensification*. Journal of Physics: Conference Series, 2011, v. 318(7), 072012 doi:10.1088/1742-6596/318/7/072012
4. G.V. Levina, M.T. Montgomery. *Helical Organization of Tropical Cyclones*. Topological Dynamics in the Physical and Biological Sciences, Cambridge, UK, 1-14 December, 2012. Workshop "Quantized Flux in Tightly Knotted and Linked Systems". On-line: Abstract, Presentation, Talk (Video):
1. http://www.newton.ac.uk/programmes/TOD/seminars/2012120512001.html
5. Levina G.V. *Helical organization of tropical cyclones*. Preprint NI13001-TOD. 47 Pages. Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences. Cambridge, UK. Preprint Series, 2013. http://www.newton.ac.uk/preprints2013.html

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СПИРАЛЬНОСТИ ПОЛЯ СКОРОСТИ АЗИАТСКОГО МУССОНА В ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ОЦА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Макоско А.А., Рубинштейн К.Г.
Росгидромет, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва,
k.g.rubin@googlemail.com

В настоящей работе впервые выполнен анализ спиральности поля скорости в регионе Азиатского муссона с учетом влияния аномального гравитационного поля Земли в численных экспериментах с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России.

Годовой ход спиральности рассчитывался по данным: реанализа (NCAR/NCEP), а также результатам базового численного эксперимента без учета аномалии силы тяжести и численного эксперимента с учетом влияния аномального гравитационного поля. Тангенциальные проекции составляющих АГПЗ рассчитывались на основе разложения в ряд сферических функции до 2160-го порядка.

Годовой ход спиральности по результатам эксперимента с учетом влияния аномального гравитационного поля оказался существенно ближе к годовому ходу спиральности, рассчитанной по данным реанализа в сравнении с базовым экспериментом. Сравнение с годовым ходом осадков, рассчитанным по данным GPCP, показало, что интенсивному нарастанию осадков (наступлению муссона) предшествует (примерно за неделю) рост значений спиральности. Следовательно, спиральность может быть хорошим индикатором начала муссона; более того, по-видимому, переход спиральности в область положительных значений соответствует наступлению муссона.

ГАЛЁРКИНСКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ В ПРОБЛЕМЕ ГЕОДИНАМО

А.П.Мирабель
Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, amirabel@bk.ru

Важнейшим установленным свойством геомагнитного поля является чередование полярности диполя главного магнитного поя (МП) Земли (для последних 170 млн лет по палеомагнитным данным отмечено около 300 инверсий, происходящих крайне нерегулярным образом с длительностями магнитозон от 10 тыс. до сотен млн лет), причем осредненный интервал между геомагнитными инверсиями, как правило, много больше, примерно в 100 раз, чем протяженность моментов переполюсовок (порядка 100 тыс. лет, а в течение последних млн лет – порядка 10 тыс.) Хронологические ряды элементов палеомагнитного поля такие как склонений, наклонений, относительных изменений напряженности поля, нормальной остаточной намагниченности и др. являются ярким проявлением детерминированного хаоса – отражением нелинейных МГД-процессов, происходящих в жидком ядре Земли. Также важной структурной особенностью МП Земли (а также больших планет) являются вариации интенсивности (от 10 до 20% среднего МП) и наклона оси магнитного диполя по отношению к оси вращения планеты во время обращения полярности. Отражение взаимосвязей между этими величинами, а также с характеристиками недипольного (квадру- или октуполярного) поля в период реверса прослеживается по археомагнитным данным. В основу механизма генерации МП Земли с отмеченными структурными особенностями в данной работе положен принцип МГД-динамо-действие закона индукции при течениях электропроводящей жидкости (расплавленное железо с примесями) во внешнем слое земного ядра с сильно вмороженным магнитным полем.

В духе идеологии А. М. Обухова путём усечения бесконечномодовых галёркинских приближений полных МГД-уравнений в сферической геометрии построена минимально возможная 9-ти модовая модель геодинамо (ГД), “работающая“ на принципе крупномасштабного α,ω- эффекта Паркера-Булларда с дифференциальным вращением (ДВ) и обратной связью, формируемыми квазигеострофическим течением с волнами Россби-Блиновой. Проанализированы энергетические переходы в рамках данной модели. Мера мощности динамо определялась динамо-числом Dy, пропоциональным произведению квадрата магнитного числа Рейнольдса (Rm) на число Россби (Ro~10^{-6}). Агрегирование параметров модели с учетом свойств масштабирования приве-

ло, помимо Dy, к еще двум внутренним параметрам: параметра s, определяющего характер радиальной стратификации и изменяющегося в узком интервале от 0,75 до 1, и параметра ν (>4), определяемого как отношение магнитных вязкостей радиального и тороидального магнитных полей. Оценены масштабы зонального и незонального коэффициентов источника энергии, оказавшимися пропорциональными обратной величине произведения Rm на квадратный корень из Ro и на число Бургера (Bu). В условиях сильной и умеренной устойчивой стратификации для критических чисел Rm ~ 10^2, характерных для жидкого ядра найдены интервалы значений Dy и ν, при которых происходят переходы от квазипериодического режима, соответствующего обратной бифуркации Хопфа и неустойчивость которого была доказана с помощью теории нормальных форм Пуанкаре, к режиму хаотического аттрактора, рассматриваемого как “генератор геомагнитного поля“ в фазовом пространстве спектральной модели с девятью компонентами. При слабой роли бароклинности указанные переходы оказались невоможными.

Проведён спектральный и фрактальный анализ временных рядов и шкал инверсий полоидального магнитного поля, сгенерированных этой динамической моделью, который продемонстрировал конечную ширину в наиболее низкочастотной части спектра геомагнитного поля. Показано, что странный аттрактор моделирует процесс генерации и нерегулярные обращения полярности полоидального дипольного поля с периодами от 100 тысяч до 10 млн лет при выборочном среднем около 1 млн лет. Эти результаты вполне сопоставимы с временной шкалой Главного геомагнитного поля. Показано, что модель ГД даёт возможность варьировать в определенных пределах наклон оси магнитного диполя по отношению к оси вращения планеты.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СМЕРЧЕЙ И ШТОРМОВОГО ВЕТРА НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА

Э.В. Переходцева
Гидрометцентр России, Москва, perekhod@mecom.ru

Возникновение смерчей и летнего штормового ветра со скоростью V>24м/с непосредственно связано с активной конвекцией, развитием мощной кучево-дождевой облачности и со скоростью нисходящих потоков порядка 30-50см/с. Эта облачность образуется там, где атмосфера

у Земли стратифицирована неустойчиво, велика влажность воздуха в тропосфере, а на высоте воздух достаточно сухой, и существует конвергенция воздушных потоков. Для возникновения таких явлений в атмосфере должны сложиться определенные аэросиноптические и термодинамические условия, характеризуемые значениями целого ряда параметров (предикторов). В синоптической практике прогноз таких явлений практически не осуществляется. Иногда дежурным синоптиком за 3ч дается штормовое предупреждение об этих явлениях, но обычно прогнозируются порывы ветра при грозе скоростью 15-18м/с. Гидродинамические модели прогноза пока еще не дают успешных прогнозов смерчей и штормового ветра со скоростью $V \geq 25$ м/с

Первые достаточно успешные результаты объективного прогноза этих явлений на текущий день (по независимым испытаниям) с заблаговременностью 12-18ч были получены по нашей первой статистической модели в 1987г (решение ЦМКП Росгидромета). Эта статистическая модель прогноза смерчей, сильных шквалов, штормового ветра и основанный на ней объективный физико-статистический метод прогноза этих явлений были разработаны еще в 1983 году, а затем уже были включены в План независимых испытаний Росгидромета. В данной модели метеорологическая ситуация, способствующая возникновению указанных явлений, представляется как многомерный вектор $\mathbf{X}(A)=(x_1(A), x_2(A), \ldots x_n(A))$, где n – число параметров атмосферы (предикторов). При разработке модели использовались значения двадцати шести потенциальных предикторов, отражающих особенности метеорологических ситуаций, способствующих возникновению смерчей и штормового ветра. Были составлены выборки векторов наличия явлений А – архив $\{\mathbf{X}_1(A)\}$ и их отсутствия в условиях неустойчиво стратифицированной атмосферы – архив $\{\mathbf{X}_2(A)\}$, проведен отбор наиболее информативных и слабо зависимых предикторов методом диагонализации средней матрицы корреляции и использования критериев информативности Махаланобиса и Вапника-Червоненкиса. Модель распознавания и прогноза таких ситуаций была построена с использованием байесовского подхода, а прогноз смерчей и штормового ветра осуществлялся по значениям линейной дискриминантной функции $U(\mathbf{X})$. В следующей таблице приведены обозначения и прогностические значения отобранных шести предикторов и значение прогностической дискриминантной функции $U(\mathbf{X})$ (для случаев смерчей значение дискриминантной функции $U(\mathbf{X})>3$, при $U(\mathbf{X})>0{,}5$ прогнозируются шквалы и порывы ветра скоростью 20м/с и более).

Прогноз смерчей, наблюдавшихся в 1984–1986 гг. и в 2009г, на текущий день по значениям прогностической функции U(X)

Пункт	Дата	V_{700}	H_0	$(T'-T)_{500}$	dt/dn	T_{max}	Td_{max}	U(X)
Иваново	9.06.1984 г.	13	630	9	5	24	15,0	3,6
Пенза	21.08.1986 г.	20	630	6	4	31	16,0	7,9
Рязань	26.08.1986 г.	22	660	7	3	30	15,0	7,3
Москва	31.08.1986 г.	18	615	2	3	31	13,5	7,9
Мос. обл.	03.06.2009 г.	17	625	6	7	23	16,0	4,13

Затем в 1993 году (для V>19м/с) и в 2000 году (для V>24м/с) были получены результаты независимых испытаний полностью автоматизированного прогноза с использованием новой статистической модели прогноза и выходных прогностических полей первой оперативной полусферной модели Гидрометцентра России (автор – Беркович Л.В.) с заблаговременностью 12-24 ч, а в 2006 г. и с заблаговременностью 36ч, проведенных по нескольким УГМС Европейской территории России (ЕТР). Оценки Т критерия Пирси-Обухова составили Т=0,68-0,9 для различных УГМС. Новая статистическая модель прогноза смерчей и штормового ветра, в которой потенциальными предикторами являлись прогностические поля первой гидродинамической полусферной модели, была создана на основе того же байесовского подхода. После проведения отбора наиболее информативного вектора-предсказателя была получена новая дискриминантная функция $U_1(\mathbf{X})$. Значения этой функции и зависящей от ее значений вероятностей прогноза смерчей и штормового ветра P(**X**) рассчитывались в узлах сетки 150х150 км. По достаточно высоким значениям вероятностей в узлах модельной сетки $P(X)>P_{пор.}>60\%$ для заблаговременности 12-24 ч) на карте ЕТР выделялись области прогнозируемого штормового ветра, в том числе и смерчей. В докладе приводятся прогнозы смерчей по этой модели в Москве в 1998 году, в 2001 году, в Дубне в 2006 году и другие случаи. Для территории Украины (до 2006 года включительно метод регулярно использовался в оперативной практике УГМС Украины, пока оперативно функционировала полусферная модель Гидрометцентра) и территории республики Беларусь оценки прогноза также были достаточно высокими. Расчет прогнозов производился оперативно два раза в сутки.

В течение 2007-2008 гг. проводилась адаптация данной статистической модели к выходной продукции новой региональной оперативной модели Гидрометцентра России, имеющей горизонтальное разрешение 75х75км. Для случая смерча в Московской области в г. Краснозаводск в докладе приводятся карты прогноза смерчей и штормового ветра по ре-

гиональной модели на 48ч, на 36ч и на 24ч. При этом на севере Московской области явно выделяется прогнозируемая область с высокими вероятностями $P(\mathbf{X})>P_{пор}=85\%$ (в процентном соотношении), охватывающая данный пункт.

В 2010-2011 гг. в Гидрометцентре России проводилась автоматизированная оценка альтернативного гидродинамико-статистического метода прогноза сильных шквалов, смерчей и порывов ветра со скоростью V>21м/с по областям 1х1 градус с целью увеличения количества явлений. Метод же рассчитан для прогноза скорости ветра V=25м/с и более с допуском 2,5м/с (как это требуется в Наставлении [1]). Поэтому предупрежденность прогноза явлений оказалась несколько ниже, чем ранее, но выше, чем по другим методам прогноза (Алексеевой А.А., Васильева Е.В.). Следует отметить, что в большинстве случаев прогнозируемые области штормового ветра и смерчей достаточно близки при расчете прогноза как на текущий день, так и на вторые сутки (в докладе приводятся соответствующие примеры), что позволяет синоптикам заблаговременно объявлять штормовое предупреждение, а администрации принимать предохранительные меры, т.к. цена пропуска существенно выше цены «ложной тревоги». В связи с тем, что точный категорический прогноз этих редких явлений на станции или в пункте практически невозможен, наиболее удобной формой выдачи прогноза этих явлений является вероятностный прогноз. Для уточнения ситуаций возникновения смерчей нами была разработана также экспертная система прогноза смерчей, требующая в настоящий момент дальнейшего тестирования, что пока осуществить не удается из-за отсутствия архивных материалов. В конечном итоге решение о прогнозе выносится администрацией с учетом рассчитанных рисков и ущерба в зависимости от значения подвергающихся разрушению объектов.

Литература

1. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Обнинск «ИГ-СОЦИН», 2009, 50 с.

ГЕОСТРОФИЧЕСКОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ – РАЗВИТИЕ ИДЕИ

Г.М. Резник

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, greznikmd@yahoo.com

В линейной постановке геострофическое приспособление является частным случаем т.н. волнового приспособления, которое может иметь место в любой линейной системе, где имеются линейные инварианты и

волны. Поскольку волны гармонически зависят от времени, то для них линейные инварианты равны нулю. Поэтому, если в начальном состоянии инварианты ненулевые, то решение естественным образом представляется в виде суммы стационарного решения с заданными ненулевыми инвариантами и волновой части с инвариантами, равными нулю. Если волны могут убегать из области первоначального возмущения, то со временем решение стремится к стационарной компоненте. Важно, что стационарную часть решения можно найти, не решая начальную задачу.

В геофизических задачах важную роль играют нелинейные системы, в которых в линейном приближении имеются волны и линейные инварианты. В случае слабой нелинейности движение, описываемое такой системой, расщепляется на быструю волновую и медленно меняющуюся компоненты. Здесь возникает целый круг важных для геофизики взаимосвязанных проблем: существование быстрых и медленных многообразий, получение балансовых моделей, задача инициализации. Удобным инструментом для исследования этих проблем является модель мелкой вращающейся воды, описываемая уравнениями:

$$\partial_t \mathbf{v} + \mathbf{v}\cdot\nabla\mathbf{v} + f\hat{z}\times\mathbf{v} + g\nabla H = 0$$

$$\partial_t H + \nabla\cdot(\mathbf{v}H) = 0,$$

где $\mathbf{v} = (u(x,y,t), v(x,y,t))$ - двумерная скорость, $H = H_0 + h(x,y,t)$ - полная глубина, H_0 - невозмущенная глубина. Линейным инвариантом здесь является линеаризованная потенциальная завихренность $\Omega = \varsigma - \dfrac{f}{H_0}h$, удовлетворяющая уравнению $\partial_t\Omega + \nabla\cdot(\mathbf{v}\Omega) = 0$. Волновой спектр состоит из инерционно-гравитационных поверхностных волн и волн Кельвина (при наличии границ).

Мы проанализировали различные режимы движения и показали, что во всех случаях движение единственным образом расщепляется на медленную и быструю компоненты, эволюционирующие на временах $1/(fRo)$ и $1/f$, соответственно, где Ro – число Россби, предполагаемое малым. Медленная компонента близка к геострофическому балансу и не испытывает влияния быстрой компоненты, по крайней мере, на временах $1/(fRo)$. Быстрая компонента состоит из волн, и, вообще говоря, зависит от медленной компоненты. Получены уравнения и начальные условия для каждой из компонент. Результаты обобщены на случаи двухслойной и непрерывно стратифицированной жидкости, а также для экваториального океана. Исследовано влияние горизонтальной компоненты угловой скорости вращения Земли на геострофическое приспособление.

VORTEX PAIR PROPAGATION DEFLECTED BY AN ISOLATED BOTTOM FEATURE

E.A. Ryzhov [1], *K.V. Koshel* [1]
[1] Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russia, ryzhovea@poi.dvo.ru

Using the quasi-geostrophic approximation [1], a model for a self-propagating vortex pair deflected by an isolated λ - shaped obstacle on the f - plane is addressed. In the absence of any background flow, the pair is deflected by the topography on an angle depending on the initial positions of the pair relative to the topography, the distance between the vortices of the pair and the strengths of the pair and the topography vortex. However, the dipole structure of the vortex pair undergoes an insignificant change during the passage. On the other hand, if an opposite-directed plane constant background flow is superimposed, the passing dynamics of the pair drastically alters. The pair can be now torn apart by the topography and the background flow, such that one vortex from the pair gets trapped by the topography, and the other vortex is carried away by the background flow.

DEFLECTION OF THE VORTEX PAIR PROPAGATION

A self-propagating vortex pair (dipole) is a prominent vortex structure consisting of two oppositely rotating vortices. With no exterior perturbations, such a vortex pair propagates rectilinearly and uniformly. In this paper, we investigate how such a vortex pair is deflected by a topographic submerged obstacle. To this end, we employ the simplest model of vortical geophysical flows, namely, the model of geostrophic singular vortices [2]. Thus, the stream-function of the flow has a simple form in Cartesian coordinates (x, y),

$$\psi = Uy + m\log\left(\frac{x^2+(y+d)^2}{x^2+(y-d)^2}\right) + s\log\left(x^2+y^2\right), \qquad (4)$$

where ψ is the dimensionless geostrophic stream-function proportional to the pressure, d is the initial distance between the pair's vortices, U is the dimensionless background flow velocity, m is the dimensionless absolute value of the pair strength, s is the dimensionless topographic parameter of the closed recirculation zone generated by the submerged λ - shaped obstacle (further we call this recirculation zone as the topographic vortex [3]).

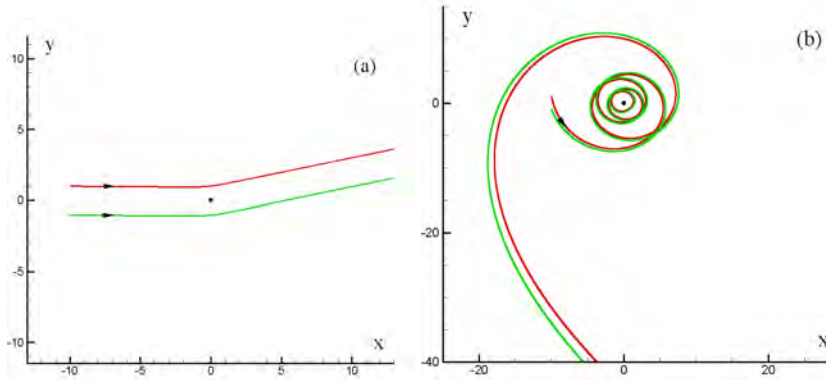


Fig. 1. Vortex pair deflection: (a) small deflection $\varsigma = 0.1$, $m = 1$\$; (b) strong deflection $\varsigma = 1$, $m = 0.5$.

Firstly, we consider the vortex dynamics in the absence of any background flow ($U = 0$). In this case, the submerged obstacle generates closed, extended to the infinity, stream-lines, which cause the vortex pair to be deviated from its rectilinear and uniform propagation. This deviation can be small (see the vortex trajectories in fig. 1a) or very strong resulting in a drastic change of the vortex pair propagation direction (see fig. 1b).

Secondly, if a background flow($U = const$) is superimposed, the vortex dynamics alters drastically. We show that the vortex pair can be now torn apart by the topography and background flow. The presence of the background flow results in that the topographic vortex becomes restricted by a separatrix. This separatrix differentiates the background flow and the topographic vortical region. So, the self-propagating vortex pair starts moving out of the topographic vortex closed region, and undergoes the influence of the topographic vortex only in its immediate vicinity.

Thus, if the background flow permits the vortex pair to penetrate the separatrix, then, the vortex pair can be torn apart (see fig. 2a). One vortex of the pair starts moving in closed trajectories about the topographic vortex becoming entrapped [4], while the other one is carried away by the background flow to infinity. Figure 2b shows the rupture of the vortex pair, which starts moving within the topographic vortex. One can see that one vortex is being still carried away by the background flow, while the other, after a short time, is moving in closed regular trajectories.

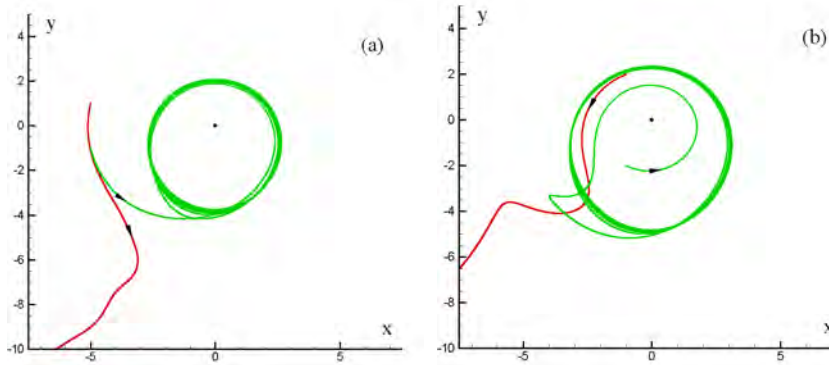


Fig. 2. Vortex pair rupture: (a) $\varsigma = 5$, $m = 1$, $W = -1$, $x = -5$, $y = 1$; (b) $\varsigma = 5$, $m = 1$, $W = -1$, $x = -1$, $y = 2$.

The reported study was partially supported by RFBR, research projects: 11-05-00025, 12-05-31011.

1.J. Pedlosky. *Geophysical Fluid Dynamics* 2 ed. – New York: Stringer. 1987.
2.Gryanik V.M., Tevs M.V. *Dynamics of singular geostrophical vortices in a N-level model of the atmosphere (ocean)* // Izv., Atmos. Ocean. Phys. 1989. V. 25. P. 179 – 188.
3.Ryzhov E.A., Koshel K.V. *Estimating the size of the regular region of a topographically trapped vortex* // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 2011. V. 105. P. 536 – 551.
4. Ryzhov E.A., Koshel K.V. *Interaction of a monopole vortex with an isolated topographic feature in a three-layer geophysical flow*// Nonlin. Processes Geophys. 2013. V. 20. P. 107 – 119.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Сафрай А.С., Ткаченко И.В.
Санкт-петербургский филиал ИО РАН, Санкт-Петербург, safr7@yandex.ru

Излагаются результаты численных экспериментов с трёхмерной негидростатической моделью вода-воздух, с использованием метода крупных вихрей – Large Eddy Simulation (LES) для осреднения полной системы уравнений Навье-Стокса и метода конечного объёма жидкости – Volume of Fluid (VOF) для описания поверхности раздела и взаимо-

действия вода-воздух, позволяющей изучать процессы формирования Верхнего Квазиоднородного Слоя (ВКС), генерацию и эволюцию внутренних и поверхностных волн (ВВ) (ПВ) и их взаимодействие. В последние годы в технических приложениях для моделирования нелинейных эффектов на свободной поверхности используется метод объема жидкости (Volume of Fluid - VoF), который рассматривает среду вода-воздух как многофазную и в ходе прямого численного моделирования эволюции поверхности и пикноклина, позволяет описывать такие эффекты как обрушение волны, образование капель и брызг, бурунов. В настоящей работе в качестве исходной используется LES модель, разработанная в СПб ФИО РАН и СПбМГТУ [1]. Для описания поверхности раздела вода – воздух реализован метод VoF [2], с помощью которого осуществляется прямое моделирование поверхности раздела. В отличие от большинства используемых моделей этого класса, жидкость полагалась стратифицированной, что расширило область применения метода. Поскольку плотность воды на три порядка больше плотности воздуха, пришлось отказаться от использования приближения Буссинеска, что существенно усложняет численную реализацию модели, но одновременно, позволяет надеяться на более полное описание исследуемых объектов/процессов. Будут изложены основы применяемых методов, их модификация, предложенная авторами, а также основные черты метода численной реализации.

В качестве иллюстрации приведены примеры численных решений для случаев:

а) генерации внутренних волн поверхностной (Рисунок 1).

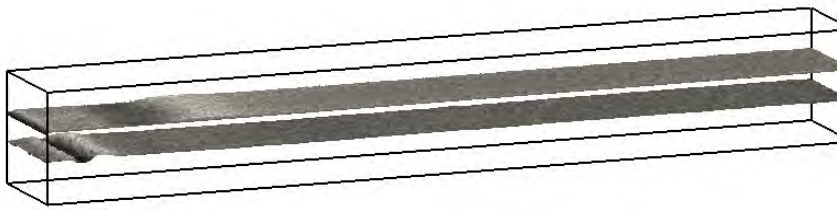


Рис. 1. Генерация двух внутренних волн поверхностной.

б) эволюции внутренних и поверхностных волн.

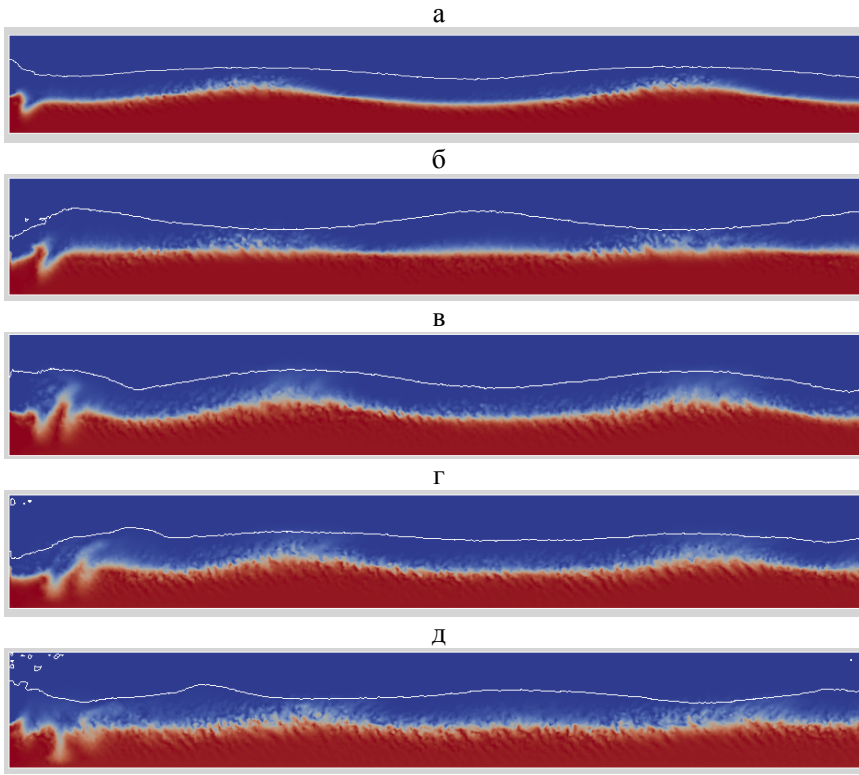
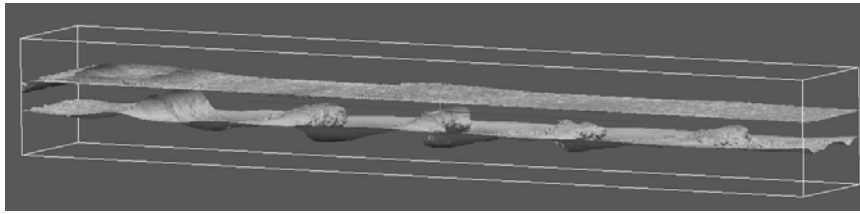


Рис. 2. Эволюция во времени свободной поверхности и поля безразмерной плотности f : а – д 1.0, 1.5, 2.0, 2. 5, 3.0 Т. Вертикальный разрез

в) взаимодействия внутренних и поверхностных волн.



Приводится анализ результатов численных экспериментов.

Литература

1. Сафрай А.С., Ткаченко И.В. *Численное моделирование гравитационных течений жидкости в наклонном канале*.// Изв. РАН,Механика жидкости и газа. 2009. № 1. С. 21-30.
2. Сафрай А.С., Ткаченко И.В., *Трехмерная негидростатическая модель вода-воздух. Численный эксперимент*., Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2013. т.6, №1, стр. 14-22.

ФАЗОВЫЕ КАРТИНЫ ВОЛН ОТ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ, ДВИЖУЩИХСЯ ОТНОСИТЕЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ (ПЕРЕМЕЩАЮЩИЙСЯ УРАГАН, ОРОГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕПЯТСТВИЕ)

П.Н. Свиркунов, М.В. Калашник
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
“НПО “Тайфун”, Обнинск, lev.ingel@gmail.com

Волновые движения в сплошных средах, как правило, обладают дисперсией. Если в такой среде равномерно перемещается некоторый источник, то он создает вокруг себя волновую картину, основными особенностями которой являются поверхности (или линии – в двумерном случае) постоянной фазы. Существующие подходы к описанию волновой картины основаны либо на представлении волновых полей интегралами Фурье и анализе их асимптотики методом стационарной фазы, либо на геометрическом построении огибающих волновых фронтов в рамках кинематической теории диспергирующих волн, развитой Уиземом. В настоящем докладе на основе кинематической теории формулируется удобное аналитическое представление для фазовых поверхностей (линий), справедливое для волн с произвольным законом дисперсии. Показано, что данное представление следует также из вариационного принципа экстремальности фазы при наличии связи в форме условия излучения Черенкова. Результаты привлечены к описанию волнового шлейфа в океане за движущимся тропическим циклоном (ураганом) и картины подветренных волн в атмосфере при обтекании орографических препятствий (изолированных гор, островов в океане). В формировании этих картин участвуют инерционно-гравитационные волны, обусловленные плотностной стратификацией среды и ее вращением как целого.

В приложениях к геофизике основное внимание уделено структуре фазовых поверхностей и зависимости тангенса угла полураствора вол-

нового конуса от числа Маха – отношения скорости движения источника (скорости набегающего потока для подветренных волн) к фазовой скорости волновых движений в отсутствие вращения. Для подветренных волн, имеющих вертикальную модовую структуру, последняя зависимость имеет вид

$$\tan\theta = \begin{cases} \dfrac{1}{\sqrt{M^2-1}}, & M>1, \\ \dfrac{3\sqrt{3}\,M^2}{8(M^2+2)\sqrt{M^2-1}}, & M<1 \end{cases} \qquad (1)$$

Согласно (1) при обтекании препятствия волновая картина формируется при произвольных числах Маха (нет порогового значения), наиболее широкий волновой след, заполняющий всю полуплоскость впереди препятствия, наблюдается при $M=1$. Переход через это значение приводит к топологической перестройке структуры фазовых линий (в горизонтальной плоскости). При $M<1$ фазовые линии (линии гребней и ложбин) имеют структуру заостренного клюва, которая хорошо прослеживается на спутниковых фотографиях облачности над обтекаемыми островами в океане. На этих фотографиях отчетливо видны боковые и поперечные ветви волновой картины. При $M>1$ структура фазовых линий напоминает распущенный веер (полностью исчезают поперечные ветви). Г.С Голицын обратил наше внимание, что зависимость (1) может быть использована для оценок скорости набегающего потока по спутниковым изображениям картины подветренных волн. Предварительные оценки скорости на основе имеющихся у нас данных оказались достаточно разумными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-05-00400-а).

Литература

1.Свиркунов П.Н., Калашник М.В. *Фазовые картины волн от локализованных источников, движущихся относительно стратифицированной вращающейся среды (перемещающийся ураган, орографическое препятствие)* // Доклады РАН. Механика. 2012. Т.447, №4. С.396-400.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ: МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА ВИХРЕВЫМИ И ВОЛНОВЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

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

Развитие оптических инструментов наземного и космического базирования позволило наблюдать тонкую структуру течений различного масштаба: от световых лет в межзвездной среде, до тысяч километров атмосферах звезд и метров в атмосфере и гидросфере Земли. В лабораторных условиях регистрируется тонкая структура вихревых и волновых течениях с масштабами от сантиметров до микрон [1]. В качестве иллюстраций приводятся картины распределения жидких и твердотельных маркеров в составных вихрях [2-4] и тонкой суспензии в стоячих волнах [5].

Отдельный цикл работ посвящен изучению процессов формирования тонкой структуры в течениях, индуцированных диффузией на топографии, и в полях периодических или присоединенных внутренних волн в непрерывно стратифицированной жидкости. Малость скоростей таких течений позволяет применять для изучения их свойств различные аналитические и численные методы. Картина течений визуализируется в лабораторных установках теневыми методами.

В данной работе математическое моделирование процессов переноса импульса, вещества и энергии в жидкостях проводится на основе фундаментальной система, включающей уравнения неразрывности, баланса импульса и энергии, диффузии компонент и замыкающее уравнение состояния с учетом условия совместимости. Как показали проведенные вычисления, симметрии такой системы, в отличие от многих модельных систем, соответствуют основным принципам физики [6].

Расчет установления двумерных течений, индуцированных диффузией в неподвижной среде на наклонной полосе и клине, позволил проследить формирование и крупных, и тонких компонент, показать особенности геометрий полей различных физических величин, таких как компоненты скорости, возмущений плотности, давления, скорости течений, завихренности, скоростей бароклинной генерации завихренности и диссипации. Детальные расчеты согласуются с данными теневой визуализации течений в лаборатории и собственными наблюдениями горных ветров [7].

Впервые дана полная математическая классификация крупномасштабных волновых и сопутствующих тонкоструктурных компонент периодических течений и установлена вырожденность классической системы уравнений неразрывности и переноса импульса в приближении однородной жидкости [8]. Асимптотическими методами исследована картина внутренних волн и сопутствующих тонкоструктурных компонент, возбуждаемых в непрерывно стратифицированных средах компактными 2D и 3D источниками, совершающими линейные и крутильные колебания [9].

В экспериментах прослежена трансформация структуры пучка периодических внутренних волн при увеличении амплитуды колебаний источника в непрерывно стратифицированной среде, формирование разрывов градиента плотности и компактных вихрей вдали от источника в областях конвергенции тонкоструктурных компонент волновых полей. Прослежен процесс образования висящих разрывов в поле присоединенных внутренних волн и их трансформации в висящие вихри и последовательности вихревых систем – аналоги некоторых типов облачных систем (лентикулярисов) в горной местности (приведены данные собственных наблюдений). Экспериментально показано сильное влияние высокоградиентных структур на динамику переноса маркирующих примесей.

В серии опытов прослежена структуризация первоначально однородной суспензии в поле стоячих волн в сосуде с неровным дном. Определены геометрия структурированных областей и значения характерных масштабов, величина которых согласуются с теоретическими оценками.

Совокупность фундаментальных уравнений, дополненных физически обоснованными граничными условиями, которые анализируются аналитическими или численными методами с учетом условий совместности и тождественности преобразований, позволяет рассчитывать и макро- и тонкоструктурные компоненты течений и составляет теоретическую основу дифференциальной механики жидкостей. Ее практическую часть образуют адекватные экспериментальные методы, позволяющие находить значения всех физических величин, входящих в фундаментальную систему и оценивать погрешности их определения непосредственно в ходе опытов. К числу наблюдаемых величин относится вектор импульса, все термодинамические параметры среды (плотность, давление, температура, концентрация компонент) и устойчиво регистрируемые параметры процессов, такие как скорости звука и света (показатель преломления), дисперсия волн и другие. Скорость жидкости – ненаблюдаемый параметр течения. Методика

организации опытов должна предусматривать регистрацию картины течений с выделением крупномасштабных и разрешением наиболее тонких компонент течений.

Литература

1. Чашечкин Ю.Д., Бардаков Р.Н., Шабалин В.В. *Регулярная тонкая структура течений в высыхающей капле суспензии наночастиц кварца* // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 3. С. 338-338.
2. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Трофимова М.В., Чашечкин Ю.Д. *Структурная устойчивость процесса переноса вещества из компактного пятна в составном вихре* // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 5. С. 578-590.
3. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. *Перенос масла в составном вихре* // Механика жидкости и газа. 2011. № 2. С. 52-64.
4. Будников А.А., Жарков П.В., Чашечкин Ю.Д. *Экспериментальное моделирование процесса переноса плавающих объектов в “мусорных островах”* // Вестник МГУ. Серия 3. Физика и астрономия. 2012 № 4. С. 83 – 88.
5. Чашечкин Ю.Д., Калиниченко В.А. *Образы топографии в структуре суспензии в стоячих волнах* // Доклады РАН. 2012. Т.446. № 3. С. 283-287.
6. . Байдулов В.Г., Чашечкин Ю.Д. *Сравнительный анализ симметрий моделей механики неоднородных жидкостей* // Доклады Академии наук. 2012. том 444. № 1. С. 38–41.
7. Чашечкин Ю.Д., Загуменный Я.В. *Структура течения, индуцированного диффузией на наклонной пластине* // Доклады Академии наук. 2012. том 444. № 2. С. 165-171.
8. Чашечкин Ю.Д. *Иерархия моделей классической механики неоднородных жидкостей* // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 3-10.
9. Васильев А.Ю., Чашечкин Ю. Д. *Трехмерные периодические течения, образующиеся при колебаниях части наклонной плоскости в неоднородной жидкости* // ПММ. 2012. Том 76. Вып. 3. С. 418-428.

КОНВЕКТИВНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЯ АТМОСФЕРЫ, НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНЫМ ПАРОМ

Шмерлин Б.Я., Калашник М.В., Шмерлин М.Б.
“НПО “Тайфун”, Обнинск, shmerlin@typhoon.obninsk.org.

Конвективные движения во влажном насыщенном воздухе сопровождаются выделением скрытой теплоты конденсации. Рассмотрена задача о конвективной неустойчивости слоя атмосферы, насыщенного водяным паром, обобщающая постановку классической задачи Рэлея. Конденсационное тепловыделение пропорционально вертикальной скорости при восходящих движениях, что соответствует выделению тепла вследствие конденсации избытка водяного пара, и отсутствует при нисходящих движениях вследствие отсутствия капель и поглощения тепла на их

испарение. Представлено аналитическое решение задачи, демонстрирующее принципиальные отличия влажной конвекции от конвекции Рэлея. При потере устойчивости в двумерном случае развиваются либо уединенные конвективные валы, либо пространственно периодические системы валов с узкими локализованными областями восходящих движений. В случае осевой симметрии возможен рост уединенных конвективных вихрей с циркуляцией, характерной для тропических циклонов (ураганов) на ранней стадии развития, и с масштабами от масштаба отдельного облака до масштаба урагана.

КОНВЕКТИВНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ОБЛАЧНОЙ СРЕДЫ

Б.Я.Шмерлин, М.Б.Шмерлин.
“НПО “Тайфун”, Обнинск, shmerlin@typhoon.obninsk.org

Конвективные движения в облачной среде и во влажном насыщенном воздухе сопровождаются выделением скрытой теплоты конденсации. Рассмотрена модельная задача о конвективной неустойчивости насыщенного водяным паром слоя атмосферы, содержащего конечную по горизонтали область, заполненную облачной средой. В пределах области, заполненной облачной средой, конденсационное тепловыделение пропорционально вертикальной скорости независимо от её знака. Это соответствует выделению тепла вследствие конденсации избытка водяного пара при восходящих движениях и поглощению тепла на испарение капель при нисходящих движениях. За пределами области, заполненной облачной средой, конденсационное тепловыделение пропорционально вертикальной скорости при восходящих движениях и отсутствует при нисходящих движениях (вследствие отсутствия капель и поглощения тепла на их испарение). Построены экспоненциально растущие со временем локализованные решения задачи, пространственная структура которых определяется горизонтальным размером области, заполненной облачной средой. Полученные решения могут соответствовать формированию облачных кластеров как с восходящими, так и с нисходящими движениями в центре, а также формированию смерчей и “глаза” в тропических циклонах.

ПРОГНОЗ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ (ТЦ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (ГММ)

Б.Я.Шмерлин, М.Б.Шмерлин.
"НПО "Тайфун", Обнинск, shmerlin@typhoon.obninsk.org

Перемещение ТЦ в рамках ГММ определяется крупномасштабным полем ветра и интенсивностью ТЦ, а также параметрами, характеризующими размер и распределение тангенциального ветра ТЦ. Приводятся результаты диагностических, квазипрогностических и прогностических расчетов перемещения ТЦ в рамках модели. Диагностические и квазипрогностические расчеты означают, что в течение всего времени жизни ТЦ в качестве крупномасштабных полей ветра и интенсивности ТЦ используется соответствующий объективный анализ. При диагностических расчетах модельные параметры (константы для каждого ТЦ) определяются из условия наилучшего совпадения расчетной и реальной траектории ТЦ в течение всего времени жизни ТЦ, при квазипрогностических расчетах - в течение предпрогностического периода, соответствующего части траектории, известной на момент квазипрогноза. Показано, что в диагностическом режиме ГММ достаточно корректно описывает перемещение ТЦ. Параметры ГММ достаточно корректно могут быть определены на предпрогностическом периоде: средние ошибки квазипрогнозов по северо-западной части Тихого океана составляют 217, 272, 258, 257, 267 км на 3, 4,…7 суток соответственно. Средняя по сезону ТЦ 2010 года ошибка прогнозов ГММ на трое суток составила 350 км по указанному региону, что незначительно (на 35 км) превышает ошибку официальных американских прогнозов и находится на уровне ошибок прогнозов наиболее развитых зарубежных динамических методов прогноза. По мере того, как прогнозы крупномасштабных полей ветра и интенсивности ТЦ будут приближаться к объективному анализу, ошибки прогнозов ГММ будут приближаться к ошибкам квазипрогнозов.

СОДЕРЖАНИЕ

А.М. ОБУХОВ: УЧЁНЫЙ, ОСНОВАТЕЛЬ ИФА
Голицын Г.С. 5

I. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ 7

ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ СМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ
Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Коняев П.А., Копылов Е.А. 7

ПРОСТЕЙШЕЕ ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ - СДВИГОВЫЙ ПОТОК ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА: ИТОГИ И УРОКИ ИССЛЕДОВАНИЯ
Баренблатт Г.И., Хорин А.Дж., Простокишин В.М. 8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ОЗОНА И ТЕПЛА В РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ И СЕЗОННЫХ УСЛОВИЯХ
Беликов И.Б., Шумский Р.А. 9

НАБЛЮДАЕМЫЕ НАРУШЕНИЯ ЗАКОНА «2/3» В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СПЕКТРАХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И УСЛОВИЯ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
Богушевич А.Я. 12

ДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНСАМБЛЯ СПОНТАННЫХ СТРУЙ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ МОМЕНТЫ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ
Вульфсон А.Н. 15

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Глазунов А.В., Дымников В.П., Кулямин Д.В., Лыкосов В.Н. 17

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ АЭРОЗОЛЯ НА ОПУСТЫНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ
Горчаков Г.И., Карпов А.В., Бунтов Д.В., Курбатов Г.А. 19

ПРОБЛЕМА ЗАМЫКАНИЯ В ТЕОРИИ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Зилитинкевич С.С. 19

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ И ВЕТРОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г. , Шаманаева Л.Г. . . . 20
КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СЛУЧАЙНОГО ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ПОЛЯ ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ, ЕСЛИ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ, ТО ЯВЛЯЕТСЯ ЗАКОНОМ ПРИРОДЫ
Кляцкин В.И. 24
КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ И СПИРАЛЬНОСТЬ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА
Копров Б.М., Копров В.М., Макарова Т.И., Азизян Г.В., Соколов Д.Ю., Фортус М.И. 25
ПОТОКИ СПИРАЛЬНОСТИ И ЗАВИХРЕННОСТИ В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
Копров Б.М., Копров В.М., Чхетиани О.Г. 28
BREAKING OF VORTEX LINES AS A ROUTE TO THE KOLMOGOROV-OBUKHOV SPECTRUM
Кузнецов Е.А. 30
RANS МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОГО АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ: ВИХРЕВОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ, ЭНЕРГЕТИКА И ГЛОБАЛЬНАЯ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. 31
NEW ALGORITHM FOR A TWO-EQUATION TURBULENCE MODEL IN THE THREE-DIMENSIONAL CLIMATIC OCEAN CIRCULATION MODEL (ATLANTIC-ARCTIC EXAMPLE).
Мошонкин С.Н, Залесный В.Б., Гусев А.В. 35
ПРОФИЛИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ТРЕНИЯ В 300-МЕТРОВОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ
Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Корнеев П.А., Мацкевич М.К. 36
ВЕРТИКАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ХОЛОДНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МАЧТЕ В ОБНИНСКЕ.
Новицкий М.А., Мазурин Н.Ф., Кулижникова Л.К., Мацкевич М.К., Корнеев П.А. 36
СПОСОБ ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСА ФРИДА И ЭФФЕКТИВНОГО ВНЕШНЕГО МАСШТАБА ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ
Носов В.В. Торгаев А.В. Больбасова Л.А., Лукин В.П. 37

ТУРБУЛЕНТНЫЕ МАСШТАБЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ МОНИНА-ОБУХОВА В АНИЗОТРОПНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ
Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. 38
КОГЕРЕНТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Носов В.В., Григорьев В.М., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В. 43
УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ
Стафеев П.Г., Бухлова Г.В., Красненко Н.П. 48
РОЛЬ СПИРАЛЬНОСТИ В КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССАХ МГД ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Фрик П.Г., Степанов Р.А. 51

II. ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 53
КЛИМАТОЛОГИЯ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ И АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ
Акперов М.Г., Мохов И.И. 53
MOISTURE BUDGET OF NORTHERN EURASIA: UNCERTAINTIES, CHANGES AND IMPLICATIONS FOR HYDROLOGY OF SIBERIAN RIVERS
Alexeev V.A. Shiklomanov A.I., Ipshita M., Groisman P.Ya. 53

ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ
Алексеев Г.В. 54
О ПРИЗНАКАХ И ПРИЧИНАХ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА
Анисимов М.В., Бышев В.И., Залесный В.Б., Мошонкин С.Н., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. 55
ПОЛЯРНОЕ УСИЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА. ОЦЕНКИ И МЕХАНИЗМЫ
Бекряев Р.В., Поляков И.В. 56
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОРОГРАФИЧЕСКИХ УСИЛЕНИЙ ВЕТРА НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАВКАЗА (НОВОРОССИЙСКАЯ БОРА) ПО ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ COSMO-RU ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ, ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
Блинов Д.В., Перов В.Л., Песков Б.Е., Ривин Г.С., Розинкина И.А. . . 57

ЛИНЕЙНЫЕ ТРЕНДЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 90 ЛЕТ НА ПРИМЕРЕ БАШКИРИИ
Васильев Д.Ю., Галимова Р.Г., Гареев А.М., Лукманов Р.Л. 57
НЕГИДРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГИДРОМЕТЕЦЕНТРА РОССИИ МЕЗОМАСШТАБНОГО КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ COSMO-RU
Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Перов В.Л., Суркова Г.В., Алферов Д.Ю., Казакова Е.В., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М. 58
ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОЗДУШНЫХ МАСС И ПЕРЕНОС АНТРОПОГЕННЫХ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РОССИЙСКУЮ АРКТИКУ: 25-ЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ
Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. 60
КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ МЕТЕОПОЛЕЙ: КАК ИХ ОЦЕНИВАТЬ И КАКАЯ ОТ НИХ ПОЛЬЗА
Гордин В.А. 62
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ МИРОВОГО ОКЕАНА И ЕЁ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В 1948-2007 гг.
Гусев А.В., Дианский Н.А. 64
РОЛЬ КОЛЕБАНИЙ МАДДЕНА-ДЖУЛИАНА И ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ ВОЛН РОССБИ В МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЬНИНЬО.
Гущина Д., Dewitte B. 65
О НЕКОТОРЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ ТЕОРИИ КЛИМАТА.
Дымников В.П. 66
НЕГАУССОВОСТЬ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ
Елисеев А.В. 67
«АТЛАНТИФИКАЦИЯ» СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА: МИФ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?
Иванов В.В., Алексеев В.А., Репина И.А. 68
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ШТОРМ – ТРЕКОВ, МЕРИДИОНАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ВЛАГИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА
Крупчатников В.Н., Мартынова Ю. 70
КЛИМАТ МИРОВОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПОПЛАВКОВ АРГО 2005-2013 ГОДОВ
Лебедев К.В., DeCarlo S., Hacker P., Maximenko N., Potemra J. 71

РЕАКЦИЯ АТМОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ НА СОКРАЩЕНИЕ ПЛОЩАДИ МОРСКОГО ЛЬДА В АРКТИКЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ
Мелешко В.П., Байдин А.А. 73
ОСОБЕННОСТИ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ВАРИАЦИЙ МЕТЕОЭЛЕМЕНТОВ
Мельников В.А., Москаленко Л.В., Кузеванова Н.И. 74
РОЛЬ АРКТИЧЕСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В ФОРМИРОВАНИИ АНОМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ РЕЖИМОВ В СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ
Мохов И.И., Семенов В.А. 75
ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ В РЕАЛЬНОСТИ И В КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ
Нигматулин Р.И., Вакуленко Н.В., Сонечкин Д.М. 76
ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КЛИМАТА БАССЕЙНА КАСПИЙСКОГО МОРЯ
Панин Г. Н., Дианский Н. А., Соломонова И.В., ВыручалкинаТ.Ю. . . 79
МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ МАСШТАБОВ И ВАРИАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ОЦЕНОК ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ
Пененко В.В. 80
АТМОСФЕРНЫЕ ПРИЛИВЫ, ТАЙФУНЫ И МУССОНЫ
Перов С.П. 81
РОЛЬ ЮЖНО-ТИХООКЕНСКОЙ ЗОНЫ КОНВЕРГЕНЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ АНОМАЛИЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ПЕРИОД СОБЫТИЙ ЭЛЬ-НИНЬО – ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ
Платонов В.С. 82
СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ
Романов Л.Н. 85
ВЛИЯНИЕ ГОДОВОГО И МЕСЯЧНОГО ОБРАЩЕНИЙ ЗЕМЛИ НА ЦИКЛИЧНОСТЬ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ, ИЗМЕНЕНИЙ ПОГОДЫ И КЛИМАТА
Сидоренков Н.С. 86
ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ПОРЫВОВ ВЕТРА
Смирнова М.М, Рубинштейн К.Г., Курбатов Г.А. 87
НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПОГОДЫ
Сонечкин Д.М. 87
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ КЛИМАТА
Тартаковский В.А., Крутиков В.А., Кусков А.И. 89

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СРЕДНЕСЕЗОННОЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ МОДЕЛЬЮ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ И СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛЬЮ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА
Толстых М.А., Дианский Н.А., Гусев А.В., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б. 90
СОЗДАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
Фролов А.В., Цветков В.И. 91
ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ
Харюткина Е.В., Логинов С.В., Ипполитов И.И. 93
КЛИМАТОЛОГИЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗИМНЕЙ ОБЛАЧНОСТИ В ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ
Чернокульский А.В., Эзау И.Н., Мохов И.И. 95
УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАМЕРЗАЮЩИХ ОСАДКОВ В ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ ГОЛОЛЕД В ДЕКАБРЕ 2010 Г.
Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. 96
ГЛОБАЛЬНЫЙ ТРОПИЧЕСКИЙ ЦИКЛОГЕНЕЗ КАК ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА В КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЗЕМЛИ.
Шарков Е.А. 97
К ОЦЕНКАМ ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ДИНАМИКУ АТМОСФЕРЫ
Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. 100

III. ФИЗИКА И СОСТАВ АТМОСФЕРЫ 101
ВЛИЯНИЕ БИОГЕННЫХ ЭМИССИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ И ОБЛАЧНОСТИ НАД МОРЕМ
Алоян А.Е. 101
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ CO2 В ТОЧКАХ НАБЛЮДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ GELCA
Ганьшин А.В. 102
А.М. ОБУХОВ И РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА КИСЛОВОДСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ ИФА И В РЕГИОНЕ КАВМИНВОД
Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Исаков А.А., Свириденков М.А. 103
ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ВЕТРОПЕСЧАНОМ ПОТОКЕ
Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Д.В. Бунтов 103

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА МОСКОВСКОГО РЕГИОНА
Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Байкова Е.С. , Карпов А.В. 104
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В МЕГАПОЛИСАХ МОСКВЫ И ПЕКИНА И ФОНОВЫХ УСЛОВИЯХ
Гречко Е.И., Ракитин В.С., Фокеева Е.В, Джола А.В., Горчилина А.В., Юрганов Л.Н. 105
СТАТИСТИКА ВОДНОСТИ ПОЛЕЙ ОБЛАКОВ
Довгалюк Ю.А., Игнатьев А.А. 106
МАЛЫЕ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
Еланский Н.Ф. 108
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИГРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ ВОДЯНОГО ПАРА С ДОЧЕРНИМИ ПОЛЯМИ КАК НЕОБХОДИМЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ
Ермаков Д.М., Шарков Е.А. 109
О РОЛИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ В УСИЛЕНИИ СТРАТОСФЕРНО-ТРОПОСФЕРНОГО ОБМЕНА
Зуев В.В., Зуева Н.Е., Савельева Е.С. 112
РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОСФЕРЫ И ВОДОЗАПАСА ОБЛАКОВ КОМПЛЕКСОМ «МИКРОРАДКОМ»
Кадыгров Е.Н., Агапов Ю.В., Горелик А.Г., Князев А.К., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Точилкина Т.А., Троицкий А.В., Шапошников А.Н. 113
КОНТРОЛЬ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
Кашин Ф. В., Арефьев В. Н., Вишератин К.Н., Каменоградский Н. Е., Сизов Н.И., Тереб Н.В. 114
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ САЖЕВОГО АЭРОЗОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ НАД ЕВРОАЗИАТСКИМ КОНТИНЕНТОМ В 2004 – 2010 ГГ.
Копейкин В.М., Ван Генчень, Пономарева Т.Я. 115
НАБЛЮДЕНИЕ ПОЛЯРНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ НАД Г. ОБНИНСКОМ В ДЕКАБРЕ 2012 Г.
Коршунов В.А., Зубачев Д.С. 116
ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ГАЗО – АЭРОЗОЛЬНЫХ ЭПИЗОДОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА
Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Глазкова А.А., Нахаев М.И. 117

ПЕРЕНОС КОРОТКОВОЛНОВОЙ И ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В ГМО ТИКСИ И ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА РОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЯХ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС».
Кустов В.Ю., Макштас А.П., Зиновьев П.В. 118
СВЯЗЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ С ИЗМЕНЕНИЯМИ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ АТМОСФЕРЫ И НА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД АЗИАТСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ В КОНЦЕ XX И НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ
Логинов С.В., Ипполитов И.И., Харюткина Е.В. 119
ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГРОЗ
Лысенко Д.А. 121
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА НА ШЕЛЬФЕ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕГО РАЗГРУЗКИ ИЗ ДОННЫХ ИСТОЧНИКОВ
Малахова В.В., Голубева Е.Н. 122
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ В ЕВРОПЕЙСКОМ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ РЕГИОНАХ РОССИИ
Медведева И.В., Перминов В.И., Семенов А.И. 125
ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА И ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В Г. ОБНИНСКЕ
Милехин Л.И., Тереб Н.В., Милехин В.Л. 126
ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДНЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ АТМОСФЕРЫ В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА ИОСИФА В ПЕРИОД 1935-2012 ГГ.
Нагурный А.П. 127
ПЕРЕНОС И КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПОСЛЕ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1» В 2011 Г.
Огородников Б.И., Калиновский А.К. 128
СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА: ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ И ТРЕНДЫ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К МЕЗОСФЕРНЫМ ПАРАМЕТРАМ
Перцев Н.Н. Далин П.А., Перминов В.И., Ромейко В.А., Dubietis A., Balčiunas R., Černis K. 130
ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ: МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАД РОССИЕЙ В СОПОСТАВЛЕНИИ С ТЕНДЕНЦИЯМИ «ПОТЕМНЕНИЯ» И «ОСВЕТЛЕНИЯ» В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ ЗЕМНОГО ШАРА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ СЕТЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.
Плахина И.Н., Махоткина Е.Л. 131

ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ СО В АТМОСФЕРЕ МОСКВЫ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ
Ракитин В.С., Гречко Е.И., Фокеева Е.В, Джола А.В., Горчилина А.В. 132
МОДЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ВЫПАДЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА
Рапута В.Ф. , Ярославцева Т.В. 133

ВАЛИДАЦИЯ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ СО В ТИПИЧНЫХ И АНОМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ОЦЕНКА ЭМИССИЙ ОТ ПОЖАРОВ И ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
Сафронов А.Н., Ракитин В.С., Джола А.В., Юрганов Л.Н. 134
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ НА КИСЛОВОДСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ ИФА ИМ. А.М. ОБУХОВА РАН (СЕВЕРНЫЙ КАВКАЗ, КАВКАЗСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ, РОССИЯ)
И.А.Сеник , Еланский Н.Ф., Артамонова М.С., А.Я.Арабов, Боровский А.Н., Елохов А.С., Емиленко А.С., Исаков А., Савиных В.В., Жуланов Ю.В., Поволоцкая Н.П. 135

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЫМОВОГО АЭРОЗОЛЯ НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ В ПЕРИОД ПОЖАРОВ ЛЕТОМ 2010 Г.
Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Горчакова И.А., Карпов А.В., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я. 139
СОДЕРЖАНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА В АТМОСФЕРЕ НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РОССИИ В УСЛОВИЯХ БЛОКИРУЮЩЕГО АНТИЦИКЛОНА ЛЕТОМ 2010 ГОДА
Ситнов С.А., Мохов И.И. 142
ГАЗОВЫЕ ПРИМЕСИ АТМОСФЕРЫ В ФОНОВЫХ И ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ
Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Лаврова О.В., Моисеенко К.Б., Васильева А.В., Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Сафронов А.Н., Сеник И.А. 143
ВЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА НА СУТОЧНЫЙ ХОД НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ
Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. 146
РЕАКЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ НА КАМЧАТКЕ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ
Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. 147

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОДИНАМИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ COSMO-RU7ART
Суркова Г.В., Кирсанов А.А., Кислов А.В., Ревокатова А.П., Ривин Г.С. 148
ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ
Тимофеев Ю.М. 151
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПРИМЕСИ ПРИ ТОРФЯНОМ ПОЖАРЕ В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРМИ
Шварц К.Г. Шкляев В.А. 151

ОЦЕНИВАНИЕ ПОЛЕЙ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ПЫЛИ ОТ ПЛОЩАДНОГО ИСТОЧНИКА
Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф. 152

IV. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА 153
О ВЛИЯНИИ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОКЕАНА
Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. 153
СЛАБАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ МОРСКИХ ВОЛН И НОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПЕРИОДОВ ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ
Бадулин С.И., Григорьева В.Г. 154
БЫСТРОЕ ТАЯНИЕ ПРИПАЙНОГО ЛЬДА В ЗАЛИВЕ СОГО (ГУБА БУОР-ХАЯ, МОРЕ ЛАПТЕВЫХ)
Богородский П.В., Макштас А.П., Кустов В.Ю. 156
ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ МОРСКОГО ЛЬДА – МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОТОКОВ
Бортковский Р.С. 157
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ НАД ПОЛЫНЬЯМИ И РАЗВОДЬЯМИ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОЙ ФОНОВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ.
Дебольский А.В., Степаненко В.М. 158
МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА
Ефимов В.В. 160
ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛА ПО ДАННЫМ ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЙ
Зиновьев Н.С., Макштас А.П., Тимачёв В.Ф., Кустов В.Ю., Соколов В.Т. 160

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГОМАССООБМЕНА В АРКТИЧЕСКИХ ПОЛЫНЬЯХ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ ПОЛЫНЬИ «КИТОВАЯ БУХТА», АРХИПЕЛАГ ШПИЦБЕРГЕН)
Иванов Б.В., Тимачев В.Ф., Бедненко В.М., Журавский Д.М., Павлов А.К., Макштас А.П. 162

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РОССИЙСКИХ ДРЕЙФУЮЩИХ СТАНЦИЯХ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС»
Макштас А.П., Соколов В.Т., Кустов В.Ю., Зиновьев Н.С. 163

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ОКЕАНА НА ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ ЗАХВАЧЕННЫХ ВОЛН.
Платов Г.А. 164

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ
Платов Г.А., Голубева Е.Н. 166

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СТРАТИФИКАЦИИ АТМОСФЕРЫ
Репина И.А. 167

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ
Сергеев Д.Е., Степаненко В.М. 168

ОСРЕДНЁННОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАСЧЁТЫ ПЛОТНОСТИ И ТЕЧЕНИЙ В ЗОНЕ ФРОНТА ГОЛЬФСТРИМА
Соколов В.А., С.П. Апухтина С.П. 170

МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА ПРИ СИЛЬНЫХ И УРАГАННЫХ ВЕТРАХ: МОДЕЛИ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ, ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА.
Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Кандауров А.А., Ежова Е.В., Казаков В.И. 171

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА КАК ЗАДАЧА ФИЗИКИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПЕРСПЕКТИВЫ
Яковлев Н.Г., Голубева Е.Н., Платов Г.А. 173

SPACE-TIME VARIABILITY OF THE FIELD OF MECHANICAL ENERGY TRANSFER FROM THE ATMOSPHERE TO THE INDIAN OCEAN
Polnikov V.G., Pogarskii F.A, Golitsyn G.S. 174

V. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН 175

РЕГИОНАЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕТЬ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТЕОСТАНЦИЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДАННЫХ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЙ
Богушевич А.Я., Кобзев А.А., Корольков В.А. , Тихомиров А.А. 175

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ
Гаврилов Н.М., Кшевецкий С.П. 178

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧЕ РАДИОЗАТМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ.
Горбунов М.Е. 179

ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ИДЕЙ А.М.ОБУХОВА О РАССЕЯНИИ И ФЛУКТУАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН В ТУРБУЛЕНТНОЙ СРЕДЕ
Каллистратова М.А. 180

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ДВУХВОЛНОВОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
Коршунов В.А., Зубачев Д.С. 183

ПРИЗЕМНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ
Красненко Н.П., Абрамочкин В.Н. , Бухлова Г.В., Стафеев П.Г. 184

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В СЛОИСТОЙ АТМОСФЕРЕ
Куличков С.Н., Чунчузов И.П., Попов О.Е., Буш Г.А. 188

РАДИОТОМОГРАФИЯ ВОЛН И ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ
Куницын В.Е., Андреева Е.С. , Нестеров И.А. 189

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ
Тептин Г.М., Хуторов В.Е., Журавлев А.А. 190

ВЫСОТНЫЕ И МЕЖПОЛУШАРНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ СОЛНЕЧНЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ ФАКТОРОВ.
Фахрутдинова А.Н., Гурьянов В.В., Гаврилов А.А., Коротышкин Д.В., Максютин С.В., Магдеев К.А., Гайфуллин И.Р. 191

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ РЕФРАКЦИИ
Шаманаева Л.Г., Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Красненко Н.Р., Тарасенков М.В. 194

VI. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА 199

ВИХРИ И ВОЛНЫ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ
Гледзер Е.Б., Чхетиани О.Г. 199

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПЕКТРАЛЬНОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ
Довженко В.А. 201

ТРЁХМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЛАБОРАТОРНОМ ТЕЧЕНИИ КОЛМОГОРОВА
Довженко В.А. 205

TOPOGRAPHIC 3D VORTICES OVER SUBMARINE OBSTACLE
Зырянов В.Н., Рыжов Е.А., Кошель К.В. 206

ЦИКЛОСТРОФИЧЕСКОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЗАКРУЧЕННЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ
Калашник М.В., Вишератин К.Н. 209

О ЗАТУХАНИИ ТЕЧЕНИЯ В ТОНКОМ СЛОЕ ВЯЗКОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ.
Кострыкин С.В., Якушкин И.Г. 211

СВЯЗЬ МЕЖДУ СПИРАЛЬНОСТЬЮ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ ВИХРЕМ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ
Курганский М.В. 212

ЧИСЛЕННАЯ ДИАГНОСТИКА ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА
Левина Г.В., Монтгомери М.Т. 212

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СПИРАЛЬНОСТИ ПОЛЯ СКОРОСТИ АЗИАТСКОГО МУССОНА В ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ОЦА УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ
Макоско А.А., Рубинштейн К.Г. 214

ГАЛЁРКИНСКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ В ПРОБЛЕМЕ ГЕОДИНАМО
Мирабель А.П. 215

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СМЕРЧЕЙ И ШТОРМОВОГО ВЕТРА НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА
Переходцева Э.В. 216

ГЕОСТРОФИЧЕСКОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ – РАЗВИТИЕ ИДЕИ
Резник Г.М. 219

VORTEX PAIR PROPAGATION DEFLECTED BY AN ISOLATED BOTTOM FEATURE
Рыжов В.А., Кошель К.В. 221

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ВНУТРЕННИХ ВОЛН
Сафрай А.С., Ткаченко И.В. 223

ФАЗОВЫЕ КАРТИНЫ ВОЛН ОТ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ, ДВИЖУЩИХСЯ ОТНОСИТЕЛЬНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СРЕДЫ (ПЕРЕМЕЩАЮЩИЙСЯ УРАГАН, ОРОГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕПЯТСТВИЕ)
Свиркунов П.Н., Калашник М.В. 226

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ: МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА ВИХРЕВЫМИ И ВОЛНОВЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ
Чашечкин Ю.Д. 228

КОНВЕКТИВНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЯ АТМОСФЕРЫ, НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНЫМ ПАРОМ
Шмерлин Б.Я., Калашник М.В., Шмерлин М.Б. 230

КОНВЕКТИВНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ОБЛАЧНОЙ СРЕДЫ
Шмерлин Б.Я., Шмерлин М.Б. 231

ПРОГНОЗ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ (ТЦ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (ГММ)
Шмерлин Б.Я., Шмерлин М.Б. 232

Научное издание

Международная конференция,
посвященная памяти
академика А. М. Обухова

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА

13-16 мая 2013 года
Сборник тезисов

Подписано к печати 27.04.2013.
Формат 60x90 1/16. Бумага офсетная № 1,80 г/м^2
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Уч.-изд. 15,5 л. Тираж 150 экз.

ООО “Издательство ГЕОС”
125315, Москва, 1-й Амбулаторный пр., 7/3-114.
Тел./Факс: (495) 959-35-16, (499) 152-19-14, 8-926-222-30-91.
E-mail: geos@ginras.ru, www.geos-books.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО ПК “Зауралье”
640022, г.Курган, ул. К. Маркса, 106.