

УДК 551.513:519.6

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ В 2003–2006 гг.

© 2009 г. В. Н. Лыкосов*, В. Н. Крупчатников**

*Институт вычислительной математики РАН

E-mail: lykossov@inm.ras.ru

**Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт

E-mail: vkруп@ommfaol.sccc.ru

Поступила в редакцию 24.03.2008 г.

Представлен краткий обзор результатов исследований российских ученых, выполненных в области динамической метеорологии в 2003–2006 гг. Обзор основан на материале, подготовленном Комиссией по динамической метеорологии Национального геофизического комитета РАН и включенном в общий информационный отчет Секции метеорологии и атмосферных наук на XXIV Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики¹.

Исследования, проведенные российскими учеными в 2003–2006 гг. в области динамической метеорологии и обсуждаемые в данном обзоре, условно могут быть отнесены к следующим разделам: “Общая динамика атмосферы”, “Крупномасштабные процессы и прогноз погоды”, “Мезомасштабные процессы”, “Турбулентность в пограничном слое” и “Математические проблемы климата и экологии”. Некоторая часть результатов, полученных в ходе этих исследований, ранее была отражена в статье Курганского и Толстых (2004).

1. ОБЩАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ

Во многих задачах динамической метеорологии динамика атмосферы может быть описана с помощью ансамбля взаимодействующих между собой вихрей и волн различного масштаба в приближении идеальной жидкости. К числу таких задач относится, в частности, важная для разработки гидродинамических методов прогноза погоды проблема адаптации к квазиравновесному состоянию течений, возмущенных внешними воздействиями. В работе Якушкина (2005) показано, что многие задачи геофизической гидродинамики, относящиеся к течениям идеальной жидкости, могут быть сформулированы с помощью канонических уравнений Гамильтона. В качестве канонических переменных при этом

целесообразно использовать основные лагранжевы инварианты – энтропию и потенциальную завихренность. Показано, что три пары канонических переменных связаны с тремя типами возмущений равновесного состояния жидкости (сжатие, смещение относительно гравитационного поля и сдвиг скорости), которые приводят к трем типам движения – акустическому, гравитационному и вихревому. В цитированной работе рассмотрен переход к упрощенным моделям течения (за счет исключения некоторых типов движения), характеризующихся меньшим числом канонических переменных.

Гидростатическое и квазигеострофическое приближения уравнений гидродинамики часто используются как для теоретического исследования крупномасштабных атмосферных процессов, так и в процедурах усвоения данных наблюдений. В работе Гледзера (2003) предложена последовательность динамических систем, занимающих промежуточное положение между описываемыми медленными движениями геострофическими уравнениями и точными уравнениями движения горизонтально стратифицированной жидкости в эллипсоидальной полости. Показано, что учет быстрых колебаний приводит к значительному изменению частот медленных движений при увеличении параметра стратификации, а также к изменению амплитуд движений, по сравнению с геострофическим случаем, для которого быстрые моды отфильтрованы.

Существенным элементом классической теории приспособления течений к квазигеострофическому течению является предположение о неограниченности пространства. В реальных же условиях ограниченной атмосферы быстрые возмущения могут возвращаться в область их генерации, так что при нелокальном нарушении равновесия наиболее важным механизмом их затухания является диссипация.

¹ Национальный отчет России по метеорологии и атмосферным наукам за 2003–2006 гг., представленный в Международную комиссию по метеорологии и атмосферным наукам во время проведения XXIV Генеральной ассамблеи Международного союза геодезии и геофизики, Перуджа, Италия, 2–13 июля 2007 г. / Ред. И.И. Мохов, А.А. Криволюцкий. М.: МАКС Пресс, 2007, 180 с. (на англ. яз.) (Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences, 2003–2006. / Eds: I.I. Mokhov and A.A. Krivolutsky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press, 2007, 180 p.).

Возникает вопрос, какое влияние на общую циркуляцию атмосферы могут оказать глобальные отклонения от квазигеострофического равновесия и каковы пороговые значения таких отклонений, приводящие к качественным изменениям динамического состояния атмосферы (Гледзер и др., 2006). В цитированной работе исследуется поведение диссипативной модели, энергетически подобной (в смысле существования различных режимов циркуляции) атмосферной системе, стратифицированной с фоновым горизонтальным градиентом температуры. С этой целью проанализированы режимы движений, описываемые исходными уравнениями и приближениями, обычно используемыми при решении задач теории общей циркуляции атмосферы. Рассмотрены реализующиеся в численных и лабораторных экспериментах режимы циркуляции Хэдли и Россби и переходы между ними. Особое внимание при этом уделено соответствию между различными режимами точных уравнений и их квазигеострофического приближения.

В работе Калашника (2004) исследованы некоторые математические аспекты теории деформационного фронтогенеза, в основе которой лежит предположение об обострении начальных температурных градиентов крупномасштабными деформационными полями скорости. Показано, что наличие достаточно большого числа лагранжевых инвариантов и функциональной связи между ними позволяет свести систему уравнений деформационной теории к системе диагностических уравнений. В случае течения с однородно распределенной потенциальной завихренностью получено точное решение задачи, которое можно использовать для сравнения с натурными данными о структуре атмосферных фронтов.

Одной из центральных проблем геофизической гидродинамики является исследование устойчивости зональных геострофических течений. В работе Калашника (2005) проведен анализ устойчивости таких течений в рамках линейного приближения и с учетом эффектов сжимаемости среды. С использованием квадратичных законов сохранения получены условия симметричной устойчивости (возмущения не зависят от координаты вдоль основного потока), сводящиеся, в частности, к тому, что поток должен быть стратифицирован устойчиво, а его потенциальный вихрь должен быть положительным. Для исследования несимметричной устойчивости сформулировано обобщенное уравнение переноса потенциальной завихренности в линеаризованной форме. В рамках такого приближения выписаны достаточные условия несимметричной устойчивости зональных геострофических течений, аналогичные известным утверждениям Релея и Фьертофта для двумерных течений идеальной жидкости.

В статье Калашника и Ингеля (2006) аналитически исследована нелинейная задача геострофической адаптации в двухкомпонентной жидкости, стратификация плотности которой зависит от стратификации температуры и концентрации примеси (влажности воздуха в случае атмосферы). Показано, что учет двухкомпонентного состава среды может приводить к появлению качественно новых особенностей структуры конечного геострофического состояния. Например, в области начального локализованного возмущения температуры в процессе адаптации может сформироваться температурное возмущение противоположного знака и/или большей амплитуды. Фронтальная поверхность в финальном состоянии может быть резко выражена лишь в поле одной из термодинамических составляющих. Эти особенности не имеют аналогов в случае однокомпонентной среды.

Работа Чурилова (2004) посвящена исследованию устойчивости течений без точек перегиба на профиле скорости, монотонно возрастающей от нуля до некоторого максимального значения. С этой целью использована двухслойная модель устойчиво стратифицированной среды, профиль плотности которой имеет вид “ступеньки”. Показано, что неустойчивость наступает при сколь угодно малом перепаде плотности, причем растет амплитуда возмущений всех масштабов. С усилением стратификации скорость распространения неустойчивых возмущений вдоль потока растет. Верхняя граница области неустойчивости определяется при этом тем, что возмущение выходит из фазового резонанса с течением и превращается в нейтральное колебание.

В работе Курганского (2003) рассмотрена задача об определении вектора скорости при стационарном трехмерном движении сжимаемой жидкости в случае, когда это движение происходит вдоль трубок тока, образованных пересечением изоповерхностей адиабатических инвариантов – потенциального вихря Эртеля и удельной энтропии. В квазигеострофическом приближении получена формула для определения вектора скорости по заданному распределению потенциальной температуры на изобарических поверхностях.

Ряд вихревых образований в атмосфере (например, смерчи и торнадо, а также горизонтально ориентированные вихри в планетарном пограничном слое) обладает ярко выраженной спиральной структурой. В работе Курганского (2005) обсуждаются кинематические свойства вектора потока спиральности для адиабатических течений в сжимаемой бароклинной атмосфере. Показано, что уравнение баланса спиральности для стационарных течений с тождественно равным нулю полем потенциального вихря Эртеля обладает решением с нулевым вектором потока спиральности. В работе также приводится аналитический пример осесиммет-

рического вихря, для которого одновременно выполняются условия отсутствия спиральности, поля потенциального вихря и вектора потока спиральности.

Тропические циклонические вихри аномально высокой интенсивности принадлежат к числу экстремальных погодных явлений. Хотя численное моделирование является одним из основных инструментов их исследования, лабораторные эксперименты существенным образом дополняют знания, относящиеся к особенностям вихреобразования. В работе Богатырева и др. (2006) изложены результаты лабораторного изучения условий возбуждения во вращающейся жидкости крупномасштабно-го спирального вихря от локализованного источника тепла. В кюветах различной геометрии и для различных жидкостей исследовалось влияние конвекции и фонового вращения на порог возбуждения спирального вихря. Установлено, что этот порог лежит в области турбулентной конвекции и относительно медленного вращения и практически не зависит от числа Прандтля.

На спутниковых фотографиях глубоких тайфунов отчетливо видны границы между глазом (здесь облачность мала или отсутствует, а ветер слаб), осесимметричной структурой верхней границы облаков (здесь располагается так называемый радиус максимальных ветров) и струеобразными “хвостами” – ливневыми полосами (Добрышман, 2004). В цитированной работе рассмотрена гидродинамическая взаимосвязь структуры поля ветра и кривизны радиального профиля приземного давления в трех областях тайфуна: на малых радиусах (до 60 км), на больших радиусах (100–600 км) и на радиусах более 700 км, где происходит смена циклонического режима на антициклональный. Показано, что в глубоких тайфунах могут возникнуть два радиуса максимальных ветров: на первом (ближе к центру) ветер слабее, чем на втором, находящемся на расстоянии 3–4 радиусов глаза. Во второй области осесимметричная структура поля ветра нарушается и возможно существование различных режимов с особенностями. В третьей области барический градиент практически исчезает и на расстояниях свыше 1000 км от центра преобладает антициклональная циркуляция.

В настоящее время взаимное влияние тропических циклонов друг на друга исследовано гораздо слабее, чем циклоны сами по себе. Как правило, такие исследования ограничиваются изучением влияния процессов взаимодействия двух циклонов на их движение. Вместе с тем, каждый из циклонов меняет состояние среды (в частности, уменьшает теплоемкость верхнего слоя океана) и тем самым воздействует на последующие циклоны. В условиях ограниченных ресурсов источника энергии циклоны, существующие одновременно, в какой-то степени “конкурируют” друг с другом. В статье Яроше-

вича и Ингеля (2006) рассмотрены две нелинейные модели, описывающие взаимодействие тропических циклонов с верхним слоем океана и друг с другом. Показано, что модели воспроизводят некоторые важные качественные особенности эволюции интенсивности тропических циклонов.

Для характеристики интегрального эффекта структурных образований в атмосфере и океане Моховым (2006) предложено использовать специальную величину – действие, которое имеет размерность [энергия] × [время]. Подобная характеристика системы, определяемая интегрированием функции Лагранжа по времени, используется в теоретической физике. В этой работе представлены расчеты действия для блокирующих атмосферных антициклонов или блокингов, с которыми связаны значительные климатические аномалии – экстремальные морозы зимой и засухи летом. В том числе отмечено, что на фоне общего потепления из-за увеличения содержания CO₂ в атмосфере, судя по анализировавшимся модельным оценкам, следует ожидать усиления интегрального эффекта зимних блокингов, с которыми связаны экстремальные морозы, в том числе в Евразии и восточной части Северной Америки. Это обусловлено увеличением над континентами количества зимних блокингов, их длительности, интенсивности и размеров. Полученные результаты свидетельствуют о том, что проявление экстремально низких температур (типа морозов в отдельных регионах в начале 2006 г. в Евразии, в частности, в России) не противоречит общей тенденции глобального потепления.

Многообразие нестационарных гидродинамических течений порождает многообразие режимов переноса различных загрязняющих веществ в атмосфере. В работе Кострыкина и Якушкина (2003) проанализированы режимы лагранжева хаоса и переноса пассивной примеси, возникающие в двумерных вихревых течениях, описываемых уравнениями гамильтоновой динамики. Показано, что лагранжев перенос включает в себя перенос вдоль линий постоянного действия, перенос по действию и выравнивание концентрации примеси во всей области. Основное внимание в работе уделено переносу по действию, который определяется расположением гиперболических особых точек и сепаратрис течения. Показано, что уменьшение размеров сепаратрисной области приводит к образованию застойных зон.

В монографии Кляцкина (2005) рассматриваются задачи о диффузии пассивной примеси в случайных потоках как в лагранжевом, так и в эйлеровом представлениях. Основное внимание в книге уделено описанию когерентных явлений, которые с вероятностью, равной единице, имеют место практически во всех реализациях процесса диффузии примеси. К ним, например, относятся кластеризация частиц примеси в случайном сжимаемом поле ско-

рости с потенциальной составляющей, кластеризация малоинерционных частиц в случайном несжимаемом поле скорости, резкое обострение градиентов поля плотности и возникновение фрактальной структуры изолиний постоянной концентрации в бездивергентном поле скорости. Все эти явления рассматриваются в монографии на основе единого подхода, связанного с анализом одноточечных пространственно-временных плотностей вероятностей.

2. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Основные процессы, формирующие годовой цикл климата, связаны с сезонными изменениями термического режима тропосферы над континентами, крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана и межширотного теплообмена. Выделение четырех сезонов, два из которых можно назвать экстремальными (зима, лето), а два – переходными (весна, лето), соответствует изменениям в годовом цикле приходящей солнечной радиации, принимающей экстремальные значения зимой и летом и сильно изменяющейся в переходные сезоны. В работах (Курбаткин, 2003; Курбаткин и др., 2004) с помощью численного моделирования общей циркуляции атмосферы и по данным реанализа исследованы межгодовые аномалии сезонной циркуляции, связанные с нарушением нормального годового хода – ослаблением или усилением циркуляции в течение зимы или лета и замедлением или ускорением сезонных переходов. Особое внимание обращено на экстремальные аномалии годового хода общей циркуляции Северного полушария в переходные сезоны, обусловленные редкими обширными аномалиями (теплыми весной или холодными осенью) температуры поверхности океана. Такие аномалии температуры поверхности океана изменяют в переходные сезоны контрасты температуры “континент–океан” на противоположные климатическим и существенно модифицируют барические планетарные волны, перестраивая температурные режимы тропосферы. Установлено, в частности, что в те годы, когда зимой у восточных берегов континентов наблюдались аномально слабые ложбины давления, последующей весной над океанами обнаруживалось низкое давление вместо климатического высокого, а также потепление на западе континентов и похолодание на востоке.

В работе Курбаткина (2006) описаны физические механизмы эволюции в течение года сезонных аномалий температуры тропосферы континентального масштаба и общей циркуляции в целом. На основе физических соображений и анализа многолетних данных наблюдений сформулировано положение о том, что в отдельные годы существует связанность крупных зимних отрицательных аномалий температуры тропосферы над континентами с положительными аномалиями в последующий

летний сезон. В работе также показано, что крупные зимние отрицательные аномалии играют стабилизирующую роль в годовом ходе климата, обусловленную процессом выравнивания аномалий температуры над океанами и континентами в условиях, когда низкочастотная изменчивость усиливающих планетарных волн порождает экстремальные явления в масштабе полушария.

Значительная роль в динамике средней и верхней атмосферы принадлежит внутренним гравитационным волнам, распространяющимся от источников, расположенных в тропосфере. Основной вклад в генерацию этих волн вносят орография земной поверхности, конвективные процессы, а также турбулентность планетарных струйных течений. В работе Гаврилова и др. (2005) предложена параметризация динамического и теплового воздействия внутренних гравитационных волн на среднюю атмосферу, в которой в отличие от ранее предложенных подходов учтены широтные неоднородности источников этих волн. На основе модельных расчетов показано, что данный фактор существенно влияет на структуру течений в стратомезосфере.

Характерной особенностью циркуляции летней мезосферы средних и высоких широт являются квазидвухсуточные волны в поле скорости ветра. Обычно принято рассматривать эти колебания как проявление распространяющейся на запад планетарной волны с зональным волновым числом 3 и/или 4. В работе Мерзлякова и др. (2005) исследованы спектры межсуточных вариаций скорости ветра в мезосфере/нижней термосфере, рассчитанные по данным радарных измерений на станциях Диксон и Эсрендж. Полученные в работе оценки зональных волновых чисел и направлений распространения волн указывают на вероятность проявления зимой в высоких широтах Северного полушария квазидвухсуточных колебаний скорости ветра, распространяющихся на восток с зональным волновым числом около 2. Возможной причиной такого рода колебаний может быть неустойчивость зимнего струйного течения.

В работе Бардина и Полонского (2005) по данным реанализа NCEP за зимний период 1952–2000 гг. проанализированы повторяемость, площадь и интенсивность циклонов и антициклонов в Европейско-Атлантическом регионе в различных фазах Североатлантического колебания. Это колебание в настоящее время рассматривается как составляющая Арктической осцилляции. В цитированной работе показано, что преобладающая в последние десятилетия положительная фаза, характеризующаяся положительными значениями временного коэффициента первой моды разложения поля давления по эмпирическим ортогональным функциям, сопровождается (по сравнению с отрицательной фазой) как статистически значимым увеличением повторя-

емости циклонов в Северной Атлантике (между 55° и 75° N) и юго-восточной части Средиземноморского региона, так и их интенсификацией. При этом в умеренных широтах Северной Атлантики (между 35° и 55° N) и над большей частью Европы повторяемость циклонов меньше в положительной фазе. Повторяемость антициклонов при интенсивной фазе Североатлантического колебания возрастает между 30° и 40° N, а глубина и площадь – в субтропиках и над северо-восточной частью Европы.

В работе Мохова и Хона (2005) проведен анализ межгодовых и долгопериодных изменений характеристик центров действия атмосферы Северного полушария зимой с использованием различных эмпирических данных с конца XIX до начала XXI в. и результатов реанализа. Для второй половины XX в. отмечены статистически значимые тенденции интенсификации Алеутского циклона и северо-атлантических центров действия. Тенденции изменения Сибирского антициклона по разным эмпирическим данным различаются. Отмечена статистически значимая связь характеристик северо-тихоокеанских центров действия с явлениями Эль-Ниньо/Ла-Нинья. Во время Эль-Ниньо (Ла-Нинья) происходит углубление (ослабление) и смещение на восток (запад) Алеутского циклона, а также ослабление (усиление) и смещение на юг (север) Гавайского антициклона. Отмечено усиление связи характеристик северо-тихоокеанских центров действия с температурой поверхности океана в области формирования Эль-Ниньо и Ла-Нинья в конце XX века. Выявлено, что к концу XX века усилилась характерная для Эль-Ниньо 4–6 летняя цикличность Алеутского и Гавайского центров действия.

В работе Хона и Мохова (2006) проведен анализ чувствительности характеристик центров действия атмосферы Северного полушария зимой на основе моделей различной сложности в сопоставлении с данными наблюдений. В том числе используются климатическая модель промежуточной степени сложности и модели общей циркуляции атмосферы и океана. Показана способность глобальных моделей описывать не только средние режимы центров действия, но и их динамику. В частности, в модельных расчетах воспроизводится статистически значимая связь характеристик северо-тихоокеанских центров действия с явлениями Эль-Ниньо/Ла-Нинья, выявленная по данным наблюдений.

Анализ разнообразных данных наблюдений, проведенный в статье Иванова и др. (2003а), свидетельствует о том, что в умеренных широтах Северного полушария имеют место периодические колебания в диапазоне от 20 до 60 суток, на которые приходится от 10 до 30% общей внутрисезонной изменчивости. Наиболее интенсивные внутрисезонные колебания наблюдаются при этом в верхней тропосфере. Распределение по территории России интенсивности спектральной плотности метеороло-

гических параметров в интервале 30–50 суток указывает на существование двух регионов, в которых их интенсивность особенно велика: район юго-восточной Азии и восточная часть Европы. Расчеты показали, что внутрисезонные колебания модулируют интенсивность колебаний синоптического диапазона, а в течение некоторых интервалов времени продолжительностью до нескольких месяцев между ними имеет место постоянный фазовый сдвиг. На основании оценок временной изменчивости параметров пограничного слоя атмосферы (скорость ветра, температура, турбулентные потоки) в цитированной статье также сделан вывод о четко выраженных максимумах на периодах 25–40 и 50 суток.

Повышение качества прогноза погоды является важной практической задачей. В настоящее время исследования по данной проблеме ведутся в следующих направлениях (Толстых, Фролов, 2005): повышение точности численного решения уравнений гидротермодинамики атмосферы, улучшение оценки начального состояния атмосферы, совершенствование параметризаций физических процессов подсеточного масштаба и учет хаотических свойств атмосферных процессов. В цитированной работе представлен обзор современного состояния первых двух из этих направлений. Современная вычислительная технология прогноза погоды должна адекватно воспроизводить атмосферные процессы как синоптического масштаба (с периодами от нескольких часов до нескольких дней), так и мезометеорологического масштаба (с характерными масштабами от десятков минут до нескольких часов). Точность прогноза определяется точностью предсказания фазовой траектории в пространстве размерности 10^7 и выше. Таким образом, необходим переход к негидростатическим уравнениям, а учитывая ограничения, накладываемые оперативной технологией и вычислительными ресурсами, также и применение эффективных численных методов.

Улучшение оценки начального состояния атмосферы связано не только с развитием наблюдательной системы, но и с совершенствованием методов усвоения данных наблюдений. Современные системы усвоения базируются либо на вариационном подходе, либо на динамико-стохастическом (фильтр Калмана). В цитированной выше статье подробно рассмотрены вариационные методы усвоения данных наблюдений, которые используются в большинстве оперативных систем усвоения. Ограничением этого подхода является то, что в отличие от алгоритма фильтра Калмана изменчивость со временем ковариаций ошибок прогноза либо совсем не учитывается, либо учитывается приближенно. Кроме того, при вариационном подходе производится оценка начального состояния по данным наблюдений за ограниченный интервал времени, в то время как фильтр Калмана состоит в последовательном оценивании состояния атмосферы по

вновь поступающим данным. В работах Климовой (2003, 2005) предложен и исследован новый субоптимальный алгоритм, основанный на теории фильтра Калмана, обобщающий алгоритм усвоения данных наблюдений и представляющий собой цикл “прогноз – анализ”. В данном алгоритме используются упрощенные модели для расчета ковариаций ошибок прогноза, основанные на расщеплении по физическим процессам, свойствах вертикальных нормальных мод модели и квазигеострофическом приближении. Дана оценка асимптотического поведения алгоритма фильтра Калмана в зависимости от свойств динамической системы, ошибок наблюдений и шумов модели. Показано, что предложенные упрощенные модели позволяют рассчитывать ковариационные матрицы и могут быть использованы в процедуре усвоения данных метеорологических наблюдений.

Важным элементом объективного анализа метеорологических полей являются их корреляционные функции, учет структуры которых позволяет максимально уменьшить ошибку интерполяции метеорологических наблюдений в узлы регулярной сетки. В статье Алдухова и Гордина (2005) приведены оценки горизонтальной анизотропии трехмерных корреляционных функций геопотенциала, температуры и скорости ветра. Показано, что наибольшая анизотропия наблюдается в тропической зоне на уровне тропопаузы и выше. Построены также поля направлений наибольшей горизонтальной корреляции в зависимости от широты и высоты.

Эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) часто используются в физике атмосферы при анализе как эмпирических данных, так и результатов численного моделирования. Как правило, исследуется пространственная структура метеорологических полей. Вместе с тем в последнее время такой подход чаще применяется и для анализа временных функций. В работе Галина (2003) исследованы спектральные свойства временных ЭОФ и теоретически показано, что периодичности главных компонент близки доминирующим периодам в соответствующем разложении Фурье и эта близость тем больше, чем больше временной интервал задания ЭОФ. Эти выводы подтверждены анализом результатов численного моделирования общей циркуляции атмосферы.

3. МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Известно, что задача гидродинамического моделирования метеорологических полей исключительно сложна в силу многомасштабности атмосферных движений – от волн планетарного масштаба до малых турбулентных вихрей, на которых происходит вязкая диссипация. Сложность моделирования динамики пограничного слоя в областях сложной конфигурации (рельеф, растительность, городская застройка и др.) обусловлена разнообразием про-

странственно-временных масштабов, в пределах которых реализуются соответствующие процессы. Так, например, в задаче о качестве воздуха в урбанизированных областях можно выделить “городской” масштаб (типичный размер города составляет несколько десятков километров), в пределах которого происходит первичная эмиссия загрязняющих веществ, и “мезомасштаб” – несколько сотен километров, где формируются и рассеиваются вторичные загрязнения воздуха (Курбацкий, Курбацкая, 2006а). В цитированной работе представлена трехпараметрическая модель турбулентности для атмосферного пограничного слоя атмосферы над урбанизированной поверхностью. Для вычисления турбулентных потоков импульса и тепла авторами цитированной работы использованы явные алгебраические соотношения, полученные из соответствующих уравнений переноса в приближении слабо равновесной турбулентности, а также prognostические уравнения для кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации и дисперсии температуры. Сравнение результатов расчетов с литературными данными и другими численными моделями показало, что предложенный подход позволяет воспроизвести наиболее важные структурные особенности турбулентности над урбанизированной поверхностью. Рассмотренная модель дополнена расчетом процессов переноса пассивных загрязняющих веществ (Курбацкий, Курбацкая, 2006б). Турбулентные потоки концентрации вычисляются из полностью явных алгебраических выражений, которые получены путем упрощения уравнений переноса для турбулентных потоков в приближении слабо равновесной турбулентности. Численные результаты расчета дисперсии загрязнения показывают, что как динамические (городская шероховатость) и термические (городской остров тепла) факторы оказывают существенное влияние на дисперсию загрязнений над урбанизированной поверхностью, так и город оказывает воздействие на дневную концентрацию загрязнения вдали от него.

Ряд работ посвящен моделированию структуры воздушных потоков в городской среде, которая имеет сложный характер и сильно зависит от конкретных метеорологических и локально-морфологических условий. Так, например, в работе Шлычкова и др. (2006) рассматриваются наиболее экологически опасные ситуации, которые реализуются при устойчивой стратификации и слабом ветре. Для воспроизведения микроциркуляции воздуха с индивидуальным описанием течений около отдельных зданий построена численная гидродинамическая модель течений в геометрически сложных областях. Расчетные динамические параметры используются для решения уравнения переноса и диффузии пассивной примеси. Приводится пример расчета для одного из жилых микрорайонов г. Новосибирска. Показано, что городская застройка играет роль

механизма экологической самозащиты за счет отвода основного загрязняющего потока на периферию микрорайона. Вместе с тем, градостроительные комплексы экранируют внешние течения и ослабляют локальные внутренние циркуляции, что затрудняет эффективное проветривание территории. Антропогенные загрязнители, генерируемые в пределах городской черты, могут в этих случаях серьезно осложнить экологическую обстановку в мегаполисе.

В больших городах увеличение содержания загрязнителей в приземном слое обусловлено различными антропогенными источниками, главными среди которых остаются автотранспорт, выбросы промышленных предприятий и крупных теплоэлектростанций, а также локальных котельных. Понимание процессов накопления вредных примесей в атмосфере города невозможно без целенаправленного проведения теоретических и экспериментальных исследований по выявлению основных особенностей метеорологических процессов для рассматриваемого региона. При этом подробная картина исследуемого процесса может быть получена с помощью математической модели, а недостаток сведений об условиях протекания процесса восполняют данные инструментального зондирования атмосферы (Старченко, Беликов, 2003; Старченко, 2004). Для получения оперативных количественных оценок качества воздуха в городе необходимо регулярное проведение измерений состава воздуха в сочетании с использованием простых прогностических зависимостей, построенных на результатах обработки эмпирического материала, а также данных сценарного анализа, выполненного с использованием прогностических многомерных численных моделей. Работа Старченко и др. (2005) посвящена исследованию влияния метеорологических условий на характер распределения химически инертных вредных примесей в атмосфере для условий города Томска. Сравнение результатов расчетов с историческими данными метеорологических наблюдений и экологического мониторинга позволило сделать вывод, что нежелательные метеорологические ситуации для Томска, как и для многих городов Западной Сибири, это – штилевые условия в сочетании с температурными инверсиями, медленный разворот ветра, приводящий к возврату “ушедшей” примеси вновь на город.

Кроме прямого численного моделирования процессов накопления вредных примесей в атмосфере города, для практических приложений (например, мониторинг процессов рассеяния загрязнителей от автомагистралей в городских каньонах) используются полуэмпирические модели. Основной задачей, решаемой с помощью таких моделей, является оценка характеристик уровней загрязнения (средние значения и дисперсии концентраций) на временных масштабах от одного до нескольких часов. В этом случае требуется полный учет метеорологи-

ческих условий и локальных особенностей рассеяния загрязнителей на городской застройке. В статье Тасейко и Михайлюты (2004) предложена полуэмпирическая модель, использующая аппарат марковских процессов для оценки загрязнения атмосферного воздуха на территории г. Красноярска.

Многочисленные данные наблюдений за облачными системами указывают на существование при неустойчивой стратификации регулярных облачных образований с горизонтальными размерами от нескольких километров до нескольких десятков километров. Среди такого рода образований можно отметить довольно часто возникающие гексагональные ячейки с облачностью в центре и безоблачным пространством по периферии и ячейки с облачностью по периферии и безоблачным пространством в центре. Работа Иванова и др. (2003б) посвящена идентификации типа ячеистой структуры и определению ее параметров по измерениям вертикальной компоненты скорости ветра в неподвижном пункте. По данным измерений показано наличие при конвекции в спектральном составе изменчивости метеоэлементов выделенных гармоник, сохраняющих свою амплитуду и фазу на протяжении нескольких часов. Полученные результаты указывают на то, что при определенных условиях в пограничном слое атмосферы имеет место вертикальный конвективный обмен, механизм которого близок к тому, что наблюдается в неустойчиво стратифицированной жидкости при критических числах Релея (с молекулярными коэффициентами вязкости и теплопроводности).

В статье Алексеевой и Вельтищева (2003) изложены результаты численного моделирования конвекции в горизонтальном слое неустойчиво стратифицированной несжимаемой жидкости с постоянными коэффициентами кинематической вязкости и температуропроводности, нагреваемом или охлаждаемом с постоянной скоростью. Оказалось, что конвективные потоки тепла определяются только значением числа Релея и не зависят ни от высоты, ни от скорости нагревания (охлаждения) слоя жидкости. При этом при фиксированном значении числа Релея проникающая способность конвекции (глубина проникновения области положительных потоков тепла в устойчиво стратифицированный слой) убывает с увеличением скорости нагревания (охлаждения) конвективного слоя.

В статье Андрианова и др. (2003) с помощью численного решения уравнений газодинамики для многофазной среды исследованы процессы образования “огненных смерчей”, возникающих при горении крупных городов. Показано, что их формированию способствуют генерация мезоциклонического течения в области пожара, интенсивное энерговыделение в очаге пожара, сопровождающееся поступлением влаги в атмосферу, и наличие влажнестойчивых слоев. При этом вертикаль-

ный вихрь, возникающий над очагом пожара, обладает структурой течения, соответствующей характерной картине течения в смерче. В частности, характерный радиус центральной области, где формируется такое течение, составляет 100–200 м, а снижение давления вблизи оси вихря достигает 50%.

Результаты исследования механизма образования облаков в области интенсивной конвективной деятельности над зонами лесных пожаров приведены в цикле работ (Мальбахов и др., 2004; Дубровская и др., 2005; Мальбахов, Шлычков, 2006). Предварительный вывод данных исследований заключается в том, что при лесных пожарах в результате интенсивной конвекции, когда над зонами горения в тропосферу выносятся тепло, влага и аэрозоль, может происходить усиление облакообразования. Аэрозоль с малым размером частиц (менее 1 мкм) служит дополнительной причиной образования ядер конденсации водяного пара в областях, находящихся выше уровня нулевой изотермы. С другой стороны, если аэрозольные частицы имеют размеры более 1 мкм, они могут вызвать кристаллизацию переохлажденных капель и ослабление осадков.

Современный этап развития математических моделей климатической системы характеризуется постоянным совершенствованием пространственного разрешения и отказом (пока на региональном уровне) от гидростатического приближения. Указанные тенденции порождают новые проблемы в параметризации процессов подсеточных масштабов, среди которых важное место занимает взаимодействие атмосферы с гидрологически неоднородной суши – территорией, покрытой густой сетью водных объектов (озера, реки, болота и т.п.) и занимающих значительную ее часть. Ярким примером такой гидрологически неоднородности может служить Западная Сибирь (здесь доля площади, занятая водными объектами, местами превышает 50%), Карелия, Северная Америка.

В работе Струнина и Хиямы (2005а) изложены результаты анализа натуральных наблюдений, полученных с помощью самолетных и наземных измерений в долине реки Лены (Струнин, Хияма, 2005а). Самолетный эксперимент, проведенный с 24 апреля по 19 июля 2000 г. в окрестности г. Якутска, выявил две особенности в структуре пограничного слоя атмосферы над холодной водной поверхностью (река шириной более 10 км). При достаточно сильной неустойчивости пограничного слоя над холодным пятном на поверхности формировался мезомасштабный термический внутренний слой с радикально отличающимися от фоновых профилями вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги. Вторая особенность состоит в том, что холодная водная поверхность с относительно малой (около 10 км) горизонтальной протяженностью порождала локальную бризовую циркуляцию, которая су-

щественным образом изменяла структуру горизонтальной адвекции, в том числе вплоть до появления зон обратного тока.

Использование вейвлет-анализа (Струнин, Хияма, 2005б) позволило разделить движения в пограничном слое атмосферы на турбулентную (с масштабами от 20 м до 2 км) и мезомасштабную (с масштабами от 2 до 20 км) составляющие. Обнаружено, что эмпирические профили потоков тепла, влаги и импульса для турбулентной и мезомасштабной компонент существенно отличаются друг от друга. Все турбулентные потоки монотонно убывали с высотой, в то время как роль мезомасштабных движений усиливалась с высотой и становилась максимальной в середине пограничного слоя. При этом оказалось, что турбулентные потоки тепла превышали мезомасштабные потоки в течение всего периода наблюдений, а вклад обеих составляющих в потоки водяного пара был приблизительно одинаков.

В целях исследования взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью сложной конфигурации (растительность, рельеф, гидрологическая сеть и др.) проведены численные эксперименты с мезомасштабной атмосферной моделью, в которой параметризованы термодинамические процессы в водоемах (Степаненко и др., 2006). Показано, что построенная таким образом модель способна правдоподобно воспроизводить как бризовую циркуляцию над отдельно взятым большим озером, так и сложную структуру течений бризовой природы над гидрологически неоднородной поверхностью суши (такой, например, как территория Западной Сибири), а также классическую горно-долинную циркуляцию. Созданная технология применена для оценки точности методов параметризации мезомасштабных потоков в моделях общей циркуляции атмосферы в условиях сильной гидрологической неоднородности суши. Показано, что в рассматриваемом случае так называемый мозаичный метод агрегирования, широко используемый в климатических моделях, позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать осредненные по площади потоки тепла и испарения.

С увеличением производительности вычислительных систем становится реальной перспектива построения мезомасштабной модели атмосферного пограничного слоя на основе вихреразрешающего моделирования. В работе Шлычкова (2006) предложена математическая модель для описания локальных атмосферных процессов на ограниченной территории с прямым воспроизведением когерентных структур в стратифицированном пограничном слое атмосферы. Модель предназначена для расчета эволюции полей ветра, температуры, влажности и осадков, характеристик турбулентности и переноса примесей над термически, орографически и

ландшафтно неоднородной подстилающей поверхностью.

4. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Одной из центральных проблем теории турбулентности является перемежаемость турбулентных потоков, в результате которой поле диссипации энергии оказывается сильно изменчивой величиной. В работе Гледзера (2005) рассмотрены модели передачи энергии по спектру. Предложенные А.М. Обуховым каскадные модели (как аппроксимация уравнений гидродинамики с квадратичной нелинейностью) описывают взаимодействие существующих в потоке структур, находящихся в геометрическом подобии друг с другом. В цитированной работе показано, что каскадные модели демонстрируют импульсный характер передачи энергии от крупных к мелким возмущениям. Взаимодействия между масштабами коррелированы, но при этом поток энергии по спектру не постоянен и возрастает с уменьшением масштаба возмущений. Наибольшие отклонения амплитуд в сравнении с осредненными величинами проявляют возмущения в диссипативном и инерционном интервалах волновых чисел, что приводит к разрушению каскадного процесса. Каскадный процесс возобновляется лишь в результате действия внешних источников.

Континуальная модель передачи энергии по спектру основана на использовании уравнений Навье–Стокса в Фурье-представлении, которые переформулированы таким образом, чтобы интеграл движения соответствовал не полной энергии всего объема, а энергии на единицу объема. Стационарные решения, описываемые такой моделью, могут соответствовать режимам, в которых крупномасштабные движения прекратились из-за того, что приток энергии от внешних сил не уравновешивает ее отток в интервал диссипации. Учет перемежаемости и связанных с нею структур в турбулентном потоке приводит к появлению неколмогоровских показателей в степенных законах для моментов скорости и диссипации. Фильтрация же этих структур приводит к классической картине взаимодействия возмущений скорости различных масштабов с традиционными значениями соответствующих показателей подобия.

В 2003–2006 гг. были продолжены исследования роли спиральности в турбулентных течениях (Пономарев и др., 2003; Пономарев, Чхетиани, 2005; Чхетиани, 2005; см. также Курганский и Толстых, 2004). Учет спиральных свойств турбулентности меняет структуру тензора напряжений Рейнольдса и тем самым экмановский годограф скорости. В работе Пономарева и др. (2003) рассмотрена гидродинамическая устойчивость модифицированного за счет учета ненулевой спиральности годографа Экмана и показано, что пороговое значение неустой-

чивости, связанной с наличием точки перегиба в профиле скорости, слегка снижается. Меняются также пространственный масштаб и ориентация наиболее неустойчивых мод. В статье Чхетиани (2005) получено стационарное решение уравнений Рейнольдса для вихревого возмущения одного из простейших фоновых сдвиговых течений, характеризующегося линейным полем скорости с цилиндрической симметрией. Образование интенсивных вихревых структур часто происходит именно на фоне подобных течений. Решения уравнений Рейнольдса, учитывающих спиральность турбулентного движения, демонстрируют возможность возникновения стационарных вихревых структур на фоне сходящегося линейного поля скорости. Такого рода вихрь характеризуется собственной спиральностью, обусловленной дополнительным вертикальным переносом вдоль его оси, повышенной интенсивностью вертикальной завихренности и уменьшением характерного масштаба.

Исследования атмосферных пыльных вихрей, часто наблюдаемых в жаркие дни в пустынях и степях, представляют не только научный интерес, но и важны с прикладной точки зрения, например, для авиационной метеорологии. Особый интерес представляет процесс выноса грубодисперсного и субмикронного аэрозоля в конвективных условиях на опустыненных территориях. В работе Горчакова и др. (2004) проанализированы результаты синхронных измерений в Приаралье (на осушенной части дна Аральского моря) флуктуаций микроструктуры аэрозоля и турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры. С помощью этих данных оценены параметры вихрей и вихревых структур, образующихся в конвективном пограничном слое атмосферы на опустыненной территории. Показано, что в областях повышенной завихренности микроструктура внутривихревого аэрозоля, генерируемого подстилающей поверхностью при ветровом выносе, аппроксимируется степенным распределением с показателем -1.5 . Рассчитаны также вертикальные конвективные потоки аэрозоля, тепла и кинетической энергии и показано, что эти потоки намного превышают соответствующие вертикальные турбулентные потоки. Получены оценки значений основных параметров пыльных вихрей и, в частности, показано, что диаметры вихрей варьируют в широких пределах – от 40 м до 9 км.

Курганский (2006), основываясь на принципе максимума информационной энтропии, предложил экспоненциальное распределение пыльных вихрей по их линейному размеру (видимому диаметру). Два независимых набора статистических данных о пыльных смерчах, которые наблюдались в США, показали удовлетворительное согласие с этим распределением, хотя средние диаметры вихрей для каждого из наборов данных различались в 5 раз. Оказалось также, что средний радиус вихря близок к значению модуля масштаба Монино–Обухова,

что ранее было подмечено для пыльных вихрей в Австралии. Распределение частиц в вихре представляет большой интерес для практических приложений, например, в радиолокации и при оценке ветрового напора на сооружения. В статье Ингеля (2004) исследуется горизонтальное движение тяжелых частиц в интенсивном стационарном осесимметричном вихре. С помощью аналитического решения показано, что частицы накапливаются на периферии вихря.

В работе Окулова и др. (2004) проведено диагностическое исследование структуры концентрированных смерчеобразных вихрей при их лабораторном моделировании в цилиндрическом контейнере с вращающейся крышкой. Результаты этого исследования отражают общие свойства изменения структуры вихрей при увеличении их интенсивности. Получено лабораторное подтверждение осесимметричных вихрей при их умеренной интенсивности. Экспериментальный анализ потери концентрированными вихрями осевой симметрии и устойчивости позволил уточнить границы переходов в осесимметричном течении от режима без распада осевого вихря к режимам с разным числом зон распада и к трехмерному нестационарному потоку.

Используя уравнение баланса интегральной спиральности для закрученных стратифицированных потоков, Чифранов (2003) ввел единственный, не зависящий от произвола в выборе масштабов длины и времени, масштабно-инвариантный критерий подобия таких течений, представляющий собой отношение характерных значений спиральности и редуцированного ускорения силы тяжести. Такой критерий позволяет оценить адекватность лабораторного моделирования реальных атмосферных процессов вихре- и спиралегенеза.

Все еще сравнительно малоизученными остаются локальные процессы в атмосферном пограничном слое, где определяющую роль играют эффекты взаимодействия потока с подстилающей поверхностью и механизмы турбулентного обмена. Так, например, в работе Ингеля (2006) было показано, что изменения с высотой эффективного коэффициента турбулентного обмена достаточно для возникновения в стратифицированной среде заметного склонового течения, даже при отсутствии каких-либо источников плавучести. Оказалось, что если коэффициент обмена растет с высотой, то у поверхности склона возникают отрицательные температурные возмущения и образуется нисходящее течение, причем с усилением устойчивости фоновой стратификации амплитуды возмущений усиливаются.

Работа Копрова и др. (2004) посвящена экспериментальному исследованию когерентных структур в пограничном слое атмосферы. Показано, что конвективные структуры приземного слоя формируются за счет проникновения куполообразных односвязных объемов теплого воздуха в более холодные

вышележащие слои. Эти структуры переносятся со скоростью, близкой к скорости ветра на высоте, равной примерно половине модуля масштаба Монина–Обухова. Внутри объема, занятого оседающим холодным воздухом, температурный профиль близок к адиабатическому. Конвективная структура обладает асимметрией: передний фронт имеет разреженные изотермы, а на заднем фронте наблюдается сгущение изолиний (микрофронт). С границами конвективных структур связана также переменяемость поля температуры, что находит свое отражение в сильной изменчивости диссипации кинетической энергии.

Процессы взаимодействия пограничного слоя атмосферы и поверхности суши играют ключевую роль в динамике такого крупномасштабного явления как Индийский муссон. В статье (Satyanarayana et al., 2003) совместная одномерная модель пограничного слоя атмосферы и деятельного слоя суши с детальным описанием термодинамических процессов применена для анализа данных специального эксперимента LASPEX-97 (Land Surface Processes Experiment), проведенного в 1997 г. в Индии. Были использованы два набора данных: для сухого и влажного периодов на полупустынной станции Ананд (северо-запад Индии, 22.4° N, 72.6° E). Результаты сравнительного анализа данных численных экспериментов и наблюдений показали, что предложенный подход перспективен для использования в моделях муссонной циркуляции.

В работе (Glazunov and Lykossov, 2003) приведено описание негидростатических трехмерных моделей пограничного слоя атмосферы и верхнего слоя океана, способных воспроизводить крупномасштабные (сравнимые с толщиной перемешанных слоев) вихревые структуры, обусловленные как термической конвекцией, так и напряжением трения ветра на поверхности океана. Модели объединены в совместную модель взаимодействующих пограничных слоев. Взаимодействие между моделями осуществляется за счет обмена потоками импульса, тепла и влаги через поверхность раздела вода–воздух. При построении моделей использовалась методология вихреразрешающего моделирования, согласно которой крупномасштабные вихри, играющие важную роль в переносе импульса, тепла и влаги (или соли) внутри пограничных слоев описываются явно. Для учета мелкомасштабной (с пространственными масштабами меньшими, чем размер ячейки сетки модели) турбулентности применяются параметризации, связывающие энергию подсеточных движений с характеристиками более медленных процессов. Системы дифференциальных уравнений моделей состоят из уравнений типа Рейнольдса для описания эволюции импульса, тепла и влаги (или соли), уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и уравнений состояния для влажного воздуха и морской воды. Для замыкания систем уравнений используются дополнительные

уравнения эволюции турбулентной кинетической энергии мелкомасштабных вихрей и скорости диссипации турбулентной энергии.

Наряду с широко применяемыми турбулентными замыканиями диффузионного типа (с использованием уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации) реализованы различные варианты замыканий динамического типа, предназначенные для вихреразрешающего моделирования при условии анизотропии турбулентного потока (Глазунов, 2006). В частности, разработана конечно-разностная модель, в которой для пространственной аппроксимации нелинейных слагаемых уравнения баланса импульса использована консервативная схема четвертого порядка точности, а в качестве турбулентного замыкания применена так называемая смешанная модель. При этом параметр, определяющий скорость диссипации турбулентной энергии, вычислялся динамически при помощи предложенного и реализованного алгоритма поиска обобщенного решения переопределенной системы линейных уравнений. Все алгоритмы модели, включая численную схему и турбулентное замыкание, выбраны таким образом, чтобы обеспечить ее применимость для расчетных областей произвольной конфигурации.

Проведен ряд длительных численных экспериментов по моделированию турбулентности в канале, ограниченном двумя одинаковыми бесконечно протяженными шероховатыми пластинами. Пространственное разрешение модели достигало величины порядка 10^7 расчетных узлов сетки. Результаты расчетов сравнивались с данными лабораторных измерений и результатами прямого численного моделирования, проведенного при максимально достижимых (при современном уровне развития вычислительной техники) числах Рейнольдса. Показано, что предложенная модель, несмотря на частично диссипативный характер турбулентного замыкания, проявляет ряд особенностей, характерных для турбулентных потоков (профиль средней скорости, спектральное распределение энергии и др.).

5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

В 2003–2006 гг. интенсивно развивалось направление, связанное с разработкой математической теории климата (Дымников, Грицун, 2005; Dymnikov et al.; 2004, Дымников и др., 2003, 2005, 2006), в основе которой лежит использование методов теории динамических систем. Одной из основных целей такой теории является разработка методологии оценки чувствительности климатической системы к малым внешним воздействиям, которая давала бы конструктивный способ вычисления изменений климата под влиянием этих воздействий. Хотя основным методом исследования климатической системы является математическое (численное) моде-

лирование, тем не менее возникает вопрос: что и с какой точностью должна воспроизводить климатическая модель, чтобы ее чувствительность к разнообразным малым внешним воздействиям была близка к чувствительности климатической системы? Чтобы ответить на этот вопрос, следует найти в явном виде оператор отклика модели на малые внешние воздействия.

С этой целью реальной климатической системе сопоставляется некоторый математический объект, представляющий собой идеализацию изучаемой системы и который можно назвать ее “идеальной” моделью. Предполагается, что такая “идеальная” модель существует, а наблюдаемая динамика климатической системы есть реализация траектории, порождаемой этой моделью. Считается также, что эта модель принадлежит классу динамических диссипативных систем. Рассматриваемая теория должна предсказывать поведение траектории на достаточно больших (в пределе бесконечных) промежутках времени. Соответствующие результаты обычно формулируются в терминах глобального аттрактора. При этом предполагается, что изучаемая система обладает глобальным аттрактором, под которым понимается некоторое множество в фазовом пространстве, такое, что все траектории, выпущенные из любой точки фазового пространства со временем притягиваются к этому множеству. Формально вся эволюция рассматриваемой динамической системы может быть разбита на два этапа: движение к аттрактору и движение на аттракторе и в его окрестности. При изучении отклика климатической системы на малые внешние воздействия считается, что динамика климатической системы происходит на ее аттракторе, а для ее качественного анализа следует обратиться к современным моделям климатической системы, которые в той или иной мере успешно описывают современный климат.

При анализе отклика климатической системы на изменения содержания атмосферных парниковых газов целесообразно использовать понятия “динамический” отклик и отклик “радиационный”. Показано (Володин, Дианский, 2003; Володин и др., 2004), что в суммарном отклике системы на изменение концентрации углекислого газа главную роль играет радиационный отклик. Это проявляется в том, что чувствительность климатической модели к увеличению содержания атмосферного CO_2 определяется, в первую очередь, количеством тепла, расходуемым на прогрев океана, а также тем, насколько меняется радиационный баланс Земли в результате изменения облачности при изменении климата. Вместе с тем, необходимо адекватно воспроизвести и динамический отклик, главной компонентой которого является Арктическая осцилляция. В работе Володина (2003) исследована величина изменения индекса Арктической осцилляции по результатам моделирования общей циркуляции ат-

мосферы (для режима непрерывного января) при заданных внешних воздействиях в виде зонально-симметричных источников охлаждения, расположенных на различных широтах и высотах. Показано, что проекция модельного отклика на Арктическую осцилляцию максимально в том случае, когда возмущение расположено в высокоширотной нижней стратосфере. Если же источник охлаждения расположен в более высоких слоях стратосферы, то сильно возбуждается лишь стратосферная часть осцилляции, в то время как в тропосфере отклик мал.

Моховым и Смирновым (2006) (см. также (Mokhov and Smirnov, 2006)) помощью нелинейных методов оценки связанности между колебательными системами по временным рядам исследована взаимная динамика Северо-Атлантической и Арктической осцилляций и Эль-Ниньо–Южной осцилляции по разным данным. При анализе использовались методы моделирования фазовой динамики и построения нелинейных прогностических моделей (нелинейный вариант “причинности по Грейнджеру”). С доверительной вероятностью не менее 0.95 сделан вывод о наличии воздействия Эль-Ниньо–Южной осцилляции на Северо-Атлантическую осцилляцию во второй половине XX века и начале XXI века при использовании обоих методов и различных характеристик осцилляций. Обратного воздействия с подобной степенью надежности не выявлено.

Изменчивость в тропической стратосфере в основном определяется квазидвухлетними колебаниями, период которых на разных уровнях изменяется от 2 до 3 лет. Эти колебания воздействуют на глобальную стратосферную циркуляцию, модулируя интенсивность обоих полярных вихрей. Вариации же интенсивности полярного вихря в нижней стратосфере оказывают влияние на знак и длительность Арктической осцилляции в нижней тропосфере. Это важно для химии полярной стратосферы и оценки реакции климата на рост концентрации парниковых газов в тропосфере, а также имеет практическое значение в силу того, что медленные вариации динамики стратосферы могут дать возможность прогнозирования фазы и продолжительности Арктической осцилляции более чем на две недели. В статье Крупчатникова и Боровко (2005), посвященной исследованию взаимодействия основного потока с нестационарными волнами Россби, представлены результаты анализа устойчивости траекторий в условиях хаотической адвекции (“лагранжевой турбулентности”). Показано, что во многих случаях это – основной механизм перемешивания воздушных масс и разрушения полярного вихря и слоя озона.

В рамках математической теории климата (Дымников, Грицун, 2005) оказалось возможным построить линейный оператор, связывающий вектор возмущений параметров задачи с вектором от-

клика на эти возмущения при естественном условии, что их норма достаточно мала. Метод вычисления оператора динамического отклика климатических моделей и реальной климатической системы на эти внешние воздействия (расчет возмущения первого момента) основан на применении диссипационно-флуктуационных соотношений для систем с большим числом положительных показателей Ляпунова. Было показано, что для широкого класса атмосферных моделей диссипационно-флуктуационная теорема позволяет вычислить этот оператор по статистическим характеристикам хаотического аттрактора модели. При этом приближенный оператор отклика позволяет с высокой точностью воспроизвести как величину, так и пространственную структуру линейной части отклика модели общей циркуляции атмосферы. Этот результат дает методологическое обоснование исследования чувствительности определенных характеристик реальной климатической системы к изменению внешних параметров с помощью расчетов непосредственно по данным наблюдений. Оказалось возможным также сформулировать и обратную задачу – найти возмущение, которое будет оптимальным для заданного отклика. По данным наблюдений и результатам моделирования построено внешнее воздействие, оптимальным образом возбуждающее Арктическую осцилляцию. Было показано, что отклик модели общей циркуляции атмосферы на заданный зонально-симметричный источник тепла максимальным образом проектируется на Арктическую осцилляцию в том случае, когда источник тепла расположен в полярной нижней стратосфере. Аналогичный вывод справедлив и для случая, когда оператор отклика был построен по данным реанализа NCEP/NCAR за 1948–2002 гг.

Проблема гидродинамического прогноза погоды осложнена тем, что траектория системы, которую необходимо предсказать, является неустойчивой по отношению к ошибкам начальных данных и по отношению к малым постоянно действующим возмущениям. Таким образом, проблема устойчивости есть ключевая проблема предсказуемости атмосферных процессов (Дымников, 2004). Цитированная работа посвящена исследованию потенциальной предсказуемости крупномасштабных атмосферных процессов первого рода, т.е. по отношению к возмущениям начальных данных. Под потенциальной предсказуемостью при этом понимается время, за которое траектория попадает в окрестность стационарного статистического решения. В работе использован метод стохастической регуляризации, с помощью которого задача сводится к оценке времени притяжения к стационарному решению уравнения Фоккера–Планка. На примере динамико-стохастического уравнения для низкочастотной изменчивости крупномасштабных атмосферных процессов показано, что наиболее предсказуемым подпространством является подпро-

странство, связанное с Арктической осцилляцией и Северо-Американским – Тихоокеанским колебанием.

В настоящее время проблемы экологического прогнозирования и проектирования в условиях изменяющихся климатических процессов и качества природной среды выходят в число приоритетных задач, поскольку они непосредственно связаны с вопросами безопасности и качества жизни. Для решения экологических проблем активно развиваются междисциплинарные исследования и создаются многофункциональные информационно-прогностические системы на базе современных вычислительных средств и технологий (Пененко, Цветова, 2003; Алоян и др., 2005). Эти системы включают различные модификации моделей климата атмосферы и моделей переноса и трансформации многокомпонентных примесей в газовом и аэрозольном состояниях.

В 2003–2006 гг. выполнен цикл исследований по развитию методов решения взаимосвязанных задач экологии и климата, посвященный проблемам экологического прогнозирования и проектирования в условиях изменяющихся климатических процессов и качества природной среды (Пененко, 2004; Пененко, Цветова, 2004, 2005; Penenko, 2003). Специфика данного класса задач состоит в том, что необходимо рассматривать широкий спектр взаимодействующих процессов на длительных интервалах времени в областях различных масштабов при неопределенностях во внешних и внутренних источниках возмущений. Необходимо также учитывать обратные связи, когда изменения в климатической системе обусловлены антропогенными и естественными воздействиями. Поэтому для целей прогнозирования и проектирования целесообразно применять сценарный подход, на основании которого можно получать необходимые оценки экологической перспективы. Важную роль здесь играет адекватный учет гидродинамического фона, который рассчитывается с помощью моделей с максимально возможным учетом фактических данных. Конструктивную основу для формирования прямых и обратных связей между различными элементами системы моделирования дают соотношения чувствительности моделей и функционалов обобщенных оценок. Возникающие при этом функции чувствительности синтезируют в себе решение прямых и сопряженных задач.

Новым и приоритетным элементом в развиваемом подходе является конструирование и усвоение в базовых моделях высокоинформативных направляющих фазовых пространств (Penenko and Tsvetova, 2006). Модели данного класса организуются на принципах декомпозиции процессов по масштабам возмущений. Направляющее фазовое пространство играет роль крупномасштабного фона. Взаимосвязи между направляющими пространствами и

моделями процессов осуществляются в режиме усвоения. Для этих целей используются специально разработанные процедуры быстрого усвоения данных (Пененко, 2005), основанные на вариационном принципе минимизации суммарной меры неопределенностей в моделях и данных. Они эквивалентны по точности процедурам усвоения с использованием сопряженных уравнений и процедурам типа калмановской фильтрации, но по эффективности алгоритмической реализации превосходят их. Направляющие пространства строятся по доступной фактической информации и (или) с использованием моделей, обладающих достаточной для изучаемых процессов степенью предсказуемости и информативности.

Информативные фактор-пространства формируются с помощью алгоритмов ортогональной декомпозиции многомерных многокомпонентных полей функций состояния климатической системы с выделением главных компонент и главных факторов. Этот аппарат позволяет представить совокупности данных о многолетней динамике изучаемых процессов в виде набора ортогональных подпространств, упорядоченных по мере убывания их информативности в соответствии с заданными критериями и на их основе формировать долговременные сценарии гидрометеорологического фона для расчета экологических ситуаций. Для отработки методики была использована база данных реанализа NCEP/NCAR за период более чем 50 лет. С помощью разработанного комплексного подхода обнаружено существование в климатической системе зон повышенных экологических рисков и уязвимости. Получены предварительные оценки областей влияния таких зон и отмечены их взаимосвязи с классическими центрами действия климатической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдухов О.А., Гордин В.А. Оценка анизотропии корреляционной структуры полей метеорологических величин по наблюдениям глобальной аэрологической сети // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 399–409.
2. Алексеева Л.И., Вельтищев Н.Ф. Потоки тепла в неустойчиво стратифицированном нагреваемом или охлаждаемом слое жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 3. С. 291–296.
3. Алоян А.Е., Пененко В.В., Козодеров В.В. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2. Математическое моделирование. М.: Наука, 2005. С. 277–349.
4. Андрианов С.А., Васильченко И.И., Голицын Г.С. и др. Численное моделирование процессов формирования “огненного смерча” // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 1. С. 3–13.
5. Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в

- Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 147–157.
6. *Богатырев Г.П., Колесниченко И.В., Левина Г.В., Сухановский А.Н.* Лабораторная модель образования крупномасштабного спирального вихря в конвективно-неустойчивой вращающейся жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 460–466.
 7. *Володин Е.М.* Проекция на арктическую осцилляцию модельного отклика, возбуждаемого зонально-симметричным термическим источником // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 589–595.
 8. *Володин Е.М., Дианский Н.А.* Отклик совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана на увеличение содержания углекислого газа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 193–210.
 9. *Володин Е.М. и группы-участники СМIP.* Связь величины глобального потепления и баланса тепла на поверхности Земли при увеличении содержания углекислого газа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 306–313.
 10. *Гаврилов Н.М., Позорельцев А.И., Якоби К.* Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 14–24.
 11. *Галин М.Б.* О спектральных свойствах временных эмпирических ортогональных функций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 235–243.
 12. *Глазунов А.В.* Моделирование нейтрально стратифицированного турбулентного потока воздуха над горизонтальной шероховатой поверхностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 307–325.
 13. *Гледзер А.Е.* О медленных движениях в редуцированных уравнениях стратифицированной жидкости в поле сил Кориолиса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 735–748.
 14. *Гледзер Е.Б.* Диссипация и перемежаемость турбулентности в рамках гидродинамических аппроксимаций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 6. С. 733–751.
 15. *Гледзер А.Е., Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Пономарев В.М.* Режимы Хэдди и Россби в простейшей модели конвекции вращающейся жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 435–459.
 16. *Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А.* Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 6. С. 759–775.
 17. *Добрышман Е.М.* О связи кривизны радиального профиля приземного давления со структурой поля ветра в тайфуне // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 4. С. 459–469.
 18. *Дубровская О.А., Козлов В.С., Мальбахов В.М.* Оценка влияния крупных дымовых частиц на процессы осадкообразования // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. С. 430–435.
 19. *Дымников В.П.* О потенциальной предсказуемости крупномасштабных атмосферных процессов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 5. С. 579–585.
 20. *Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я. и др.* Климат и его изменения: математическая теория и численное моделирование // Сибирский журнал вычислительной математики. 2003. Т. 6. С. 347–379.
 21. *Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я. и др.* Чувствительность климатической системы к малым внешним воздействиям // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 77–92.
 22. *Дымников В.П., Грицун А.С.* Современные проблемы математической теории климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 294–314.
 23. *Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. и др.* Моделирование климата и его изменений // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2. Математическое моделирование. М.: Наука, 2005. С. 38–175.
 24. *Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М.* Проблемы моделирования климата и его изменений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 5. С. 618–636.
 25. *Иванов В.Н., Стерин А.М., Хохлова А.В.* Внутрисезонные колебания атмосферы в умеренных широтах Европы и Азии и их параметры // Метеорология и гидрология. 2003а. № 5. С. 31–43.
 26. *Иванов В.Н., Русаков Ю.С., Филиппов С.С.* Метод идентификации ячейковых конвективных структур по данным измерений в пограничном слое атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003б. Т. 39. № 3. С. 297–309.
 27. *Ингель Л.Х.* О движении тяжелых частиц в смерче // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 851–854.
 28. *Ингель Л.Х.* Об одном механизме склоновых течений // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 101–104.
 29. *Калашиник М.В.* Аналитические решения в теории деформационного фронтогенеза // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 2. С. 178–188.
 30. *Калашиник М.В.* Условия симметричной и несимметричной устойчивости геострофических течений в сжимаемой атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 172–177.
 31. *Калашиник М.В., Ингель Л.Х.* Геострофическое приспособление и фронтогенез в стратифицированных двухкомпонентных средах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 554–565.
 32. *Климова Е.Г.* Численные эксперименты по усвоению метеорологических данных с помощью субоптимального фильтра Калмана // Метеорология и гидрология. 2003. № 10. С. 54–67.
 33. *Климова Е.Г.* Алгоритм усвоения данных наблюдений на основе адаптивного субоптимального фильтра Калмана // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 24–35.
 34. *Кляцкин В.И.* Диффузия и кластеризация оседающей примеси в случайных гидродинамических потоках. М.: Физматлит, 2005. 160 с.
 35. *Копров Б.М., Копров В.М., Кадыгров Е.Н. и др.* Экспериментальное исследование конвекции в пограничном слое атмосферы: когерентные структу-

- ры при ясном небе и при кучевой облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 4. С. 470–484.
36. *Кострыкин С.В., Якушкин И.Г.* Перенос пассивной примеси и лагранжевы структуры в нестационарных вихревых течениях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 749–759.
 37. *Крупчатников В.Н., Боровко И.В.* Некоторые особенности динамики полярного вихря // Сибирский журнал вычислительной математики. 2005. Т. 8. С. 325–335.
 38. *Курбаткин Г.П.* Два характерных аномальных режима при численном моделировании атмосферной циркуляции переходных сезонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 723–734.
 39. *Курбаткин Г.П.* О механизме усиления амплитуды годового хода аномалий температуры тропосферы континентального масштаба // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 147–156.
 40. *Курбаткин Г.П., Дегтярев А.И., Короткова Е.А.* Об определении межсезонной эволюции некоторых аномалий общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 5. С. 586–592.
 41. *Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.* Трехпараметрическая модель турбулентности для атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006а. Т. 42. № 4. С. 476–494.
 42. *Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И.* Дисперсия пассивного трассера над городом: численный эксперимент // Метеорология и гидрология. 2006б. № 11. С. 19–30.
 43. *Курганский М.В.* К задаче о вычислении скорости стационарных течений в атмосфере и океане // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 645–654.
 44. *Курганский М.В.* Поток спиральности в сжимаемой бароклиной атмосфере и его свойства // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 8–13.
 45. *Курганский М.В.* Распределение по размеру пыльных вихрей в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 347–354.
 46. *Курганский М.В., Толстых М.А.* Некоторые направления развития динамической метеорологии в России за 1999–2002 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 5. С. 702–711.
 47. *Мальбахов В.М., Шлычков В.А., Леженин А.А., и др.* Численная модель распространения дымового шлейфа при лесных пожарах с параметрическим учетом процессов горения // География и природные ресурсы. Спец. выпуск. 2004. С. 170–175.
 48. *Мальбахов В.М., Шлычков В.А.* Термическая конвекция как механизм скоростного переноса аэрозоля в верхние слои атмосферы // Аэрозоли Сибири / Под ред. К.П. Куценого. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. С. 365–371.
 49. *Мерзляков Е.Г., Портнягин Ю.И., Макаров Н.А. и др.* Распространяющиеся на восток межсезонные колебания ветра в полярной мезосфере/нижней термосфере Северного полушария // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 92–104.
 50. *Мохов И.И.* Действие как интегральная характеристика климатических структур: Оценки для атмосферных блокингов // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 403–406.
 51. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Исследование взаимного влияния процессов Эль-Ниньо – Южное колебание и Северо-Атлантического и Арктического колебаний нелинейными методами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 5. С. 650–667.
 52. *Мохов И.И., Хон В.Ч.* Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменений центров действия атмосферы в Северном полушарии. Анализ данных наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 6. С. 723–732.
 53. *Окулов В.Л., Соренсен Ж.Н., Варламова Е.А.* Возникновение асимметрии и нестационарности при лабораторном моделировании гидродинамической структуры смерча // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 2. С. 195–209.
 54. *Пененко В.В.* Управление экологическими рисками с позиций устойчивого развития: модели и методы // География и природные ресурсы. 2004. Спец. выпуск. С. 132–140.
 55. *Пененко В.В.* Вариационное усвоение данных в реальном времени // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10. Ч. 1. С. 9–20.
 56. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Главные факторы климатической системы глобального и регионального масштабов и их применение в экологических исследованиях // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. С. 407–414.
 57. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Изучение изменчивости климатической системы с помощью факторных пространств // География и природные ресурсы. 2004. Спец. выпуск. С. 143–152.
 58. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Система моделирования для климато-экологических исследований // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10. Ч. 2. С. 90–98.
 59. *Пономарев В.М., Хапаев А.А., Чхетиани О.Г.* Роль спиральности в формировании вторичных структур в экмановском пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 4. С. 435–444.
 60. *Пономарев В.М., Чхетиани О.Г.* Полуэмпирическая модель пограничного слоя атмосферы с параметризацией влияния турбулентной спиральности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 4. С. 464–479.
 61. *Старченко А.В.* Численное моделирование городской и региональной атмосферы и оценка ее влияния на перенос примеси // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9. Ч. 2. С. 98–107.
 62. *Старченко А.В., Беликов Д.А.* Численная модель оперативного контроля уровня загрязнения городского воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. С. 657–665.
 63. *Старченко А.В., Беликов Д.А., Вражнов Д.А. и др.* Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. С. 455–461.
 64. *Степаненко В.М., Миранда П.М., Лыкосов В.Н.* Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы с гидрологически неоднородной сушей // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. Ч. 3. С. 129–136.

65. Струнин М.А., Хияма Т. Самолетные исследования атмосферного пограничного слоя над долиной реки Лены. Часть I. Мезомасштабная структура // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005а. Т. 41. № 2. С. 178–200.
66. Струнин М.А., Хияма Т. Самолетные исследования атмосферного пограничного слоя над долиной реки Лены. Часть II. Спектральная структура // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005б. Т. 41. № 3. С. 378–398.
67. Тасейко О., Михайлюта С. Моделирование распространения загрязнителей от автотранспорта в условиях городской застройки // География и природные ресурсы. Спец. выпуск / Под ред. В. Снытко, Е. Гордова. 2004. С. 180–185.
68. Толстых М.А., Фролов А.В. Некоторые современные проблемы численного прогноза погоды // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 315–327.
69. Хон В.Ч., Мохов И.И. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменений центров действия атмосферы в Северном полушарии. Модельные оценки чувствительности к глобальным климатическим изменениям // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 749–756.
70. Чефранов С.Г. О масштабно-инвариантном критерии подобия закрученных потоков при лабораторном моделировании торнадоподобных вихрей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 760–765.
71. Чурилов С.М. Об устойчивости стратифицированных сдвиговых течений с монотонным профилем скорости без точек перегиба // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. С. 809–820.
72. Чхетиани О.Г. Интенсификация завихренности в турбулентных течениях со спиральностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 167–171.
73. Шлычков В.А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихреразрешающего подхода // Аэрозоли Сибири / Под ред. К.П. Куценого. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006 г. С. 372–389.
74. Шлычков В.А., Бородулин А.И., Десятков Б.М. Численное моделирование циркуляции воздуха и переноса примеси в городских агломерациях с явным учетом элементов ландшафта // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. С. 552–556.
75. Якушкин И.Г. О лагранжевом и гамильтоновом описании моделей геофизических течений идеальной жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 158–166.
76. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Диагноз взаимодействия тропических циклонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 766–770.
77. Dymnikov V.P. Adjoint equations, integral conservation laws, and conservative difference schemes for nonlinear equations of mathematical physics // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2003. V. 18. P. 229–242.
78. Dymnikov V.P., Volodin E.M., Galin V.Ya. et al. Modelling the climate system response on small external forcing // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2004. V. 19. P. 131–161.
79. Glazunov A.V., Lykossov V.N. Large eddy simulation of interaction of ocean and atmospheric boundary layers // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2003. V. 18. P. 279–295.
80. Mokhov I.I., Smirnov D.A. El-Nino/Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear techniques from climatic indices // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P.L03708, doi: 10.1029/2005GL024557.
81. Penenko V.V. Mathematical modeling for studies of anthropogenic impact on the climatic system // Proc. SPIE. 2003. V. 5397. P. 1–11.
82. Penenko V., Tsvetova E. Methods of sensitivity theory and orthogonal decomposition for studying climate dynamics and pollution // Proc. SPIE. 2006. V. 6522. P. 652223.
83. Satyanarayana A.N.V., Lykossov V.N., Mohanty U.C., Machul'skaya E.E. Parameterization of land surface processes to study boundary layer characteristics over a semiarid region in Northwest India // J. Appl. Met. 2003. V. 42. P. 528–540.

Some Aspects in the Development of Dynamic Meteorology in Russia in 2003–2006

V. N. Lykossov^a and V. N. Krupchatnikov^b

^a Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 8, Moscow, 119991 Russia

e-mail: lykossov@inm.ru

^b Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute

e-mail: vkrup@ommfaol.sccc.ru

Received March, 24, 2008

Abstract—A brief review of the studies performed by Russian scientists in dynamic meteorology in 2003–2006 is presented. This review is based on the material prepared by the Commission on Dynamic Meteorology of the National Geophysical Committee of the Russian Academy of Sciences and included in the general information report of the Section of Meteorology and Atmospheric Sciences at the 24th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics.