УДК 551.513-519.6

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ В 2007–2010 гг.

© 2012 г. В. Н. Лыкосов^{1, 2}, В. Н. Крупчатников^{3, 4}

¹Институт вычислительной математики РАН 119333 Москва, ул. Губкина, 8 ²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1 E-mail: lykossov@inm.ras.ru ³Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт 630099 Новосибирск, ул. Советская, 30 ⁴Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 6 E-mail: vkrup@ommfao1.sscc.ru Поступила в редакцию 01.06.2011 г., после доработки 29.08.2011 г.

В публикации представлен краткий обзор результатов исследований российских ученых, выполненных в области динамической метеорологии в 2007–2010 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 XXV Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики.

Ключевые слова: динамическая метеорология, динамика атмосферы, мезомасштабные процессы, турбулентность, прогноз погоды, климат, экология, математическое моделирование.

Исследования, проведенные российскими учеными в 2007–2010 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".

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. Интерес исследователей к волновым движениям связан, в первую очередь, с тем, что волны являются источником неустойчивости, приводящей к значительной перестройке общей динамической картины (в частности, к развитию циклонов, тайфунов, торнадо и смерчей). В работе Романовой и Якушкина [1] рассмотрены методы исследования эволюции волновых возмущений в стратифицированных по плотности сдвиговых течениях идеальной несжимаемой жидкости.

Уравнения, которыми могут быть описаны рассматриваемые движения, являются гамильтоновыми, а записанные в терминах полулагранжевых переменных имеют интегродифференциальный вид. Это позволяет изучать как непрерывные, так и разрывные решения. В цитируемой работе рассмотрены две динамические системы. Одна из них служит для описания гравитационных волн в сдвиговом течении, развивающихся в невозмущенной среде с резкими градиентами плотности и скорости течения (простейший пример - модель Кельвина–Гельмгольца). Другая динамическая система описывает сдвиговые и гравитационно-сдвиговые волны в двумерном течении с резкими градиентами завихренности. В статье приведены результаты решения задачи о динамике возмущений в течении с непрерывным распределением завихренности, полученные при рассмотрении линейной волновой динамики в узком слое с постоянным значением градиента невозмущенной завихренности и линейного взаимодействия возмущений в двух слоях такого типа. Использованный подход дает возможность детально изучить такое взаимодействие вблизи критического уровня и процесс образования структур типа "кошачьего глаза".

Статья Романовой [2] посвящена исследованию резонансного взаимодействия волн дискретного и непрерывного спектра. Во взаимодействии участвуют гравитационно-сдвиговая волна, образующаяся на скачке плотности и завихренности невозмущенного течения, и волна на слабом скачке завихренности, подобная волне непрерывного спектра. Исходя из трехслойной модели в форме гамильтоновой системы уравнений динамики возмущений, получена эволюционная система для амплитуд взаимодействующих волн. В случае линейного приближения (слабая связь волн) установлены условия на параметры задачи, при которых возникает неустойчивость. Показано, что учет кубичной нелинейности в эволюционной системе приводит к стабилизации возмущений в случае, когда коэффициент в соответствующем выражении для нелинейного слагаемого положителен.

Ряд вихревых образований в атмосфере (например, тропические циклоны, торнадо и смерчи, а также горизонтально ориентированные вихри в планетарном пограничном слое) обладает ярко выраженной спиральной структурой. В работе Курганского [3] предложено рассматривать направленный вниз поток спиральности (через верхнюю границу пограничного слоя атмосферы) как меру интенсивности атмосферных вихрей. Используя общее уравнение баланса спиральности, автор цитированной публикации определяет этот поток как произведение куба максимальной скорости ветра на ширину полосы, заметаемой максимальным ветром при перемещении вихря. Оказывается, что для интенсивных вихрей в установившейся (зрелой) фазе поток спиральности определяет скорость ее разрушения силами турбулентного трения. В статье представлены результаты сравнительного (по значениям потока спиральности) анализа пылевых вихрей на Земле и на Марсе, а также смерчей. Обнаружено, в частности, что гигантские пылевые вихри на Марсе соответствуют земным смерчам (торнадо), хотя из-за различия в плотности воздуха на обеих планетах их динамическое воздействие более чем в 100 раз слабее, чем у смерчей.

Можно выделить три основных диапазона атмосферной турбулентности [4]: макротурбулентность с горизонтальными масштабами от сотен километров до планетарных ($\approx 10^4$ км), мезотурбулентность (с масштабами от километров до сотен километров) и микротурбулентность с масштабами менее километра. Во всем пространственном макромасштабном диапазоне атмосферу можно считать квазидвумерной (отношение вертикального масштаба к горизонтальному $\varepsilon < 10^{-2}$) и квазигеострофической жидкостью (число Россби– Кибеля Ro = $U/lL \ll 1$, l – параметр Кориолиса, U – характерный масштаб скорости, L – характерный пространственный масштаб). Однако вопрос, на каких масштабах пространственный спектр атмосферной макротурбулентности определяется ее квазидвумерностью, а на каких – квазигеострофичностью, является чрезвычайно важным из-за существенной разницы в механизме формирования этих двух видов геофизической турбулентности (см., например, работу [5]).

Анализ данных самолетных измерений, проведенных в средних и высоких широтах Северного полушария на высотах от 9 до 14 км, показал, что одномерные горизонтальные спектры скорости ветра и температуры имеют примерно одну и ту же форму в диапазоне масштабов от 2.6 до 10⁴ км [6]. При этом наклон спектральных распределений оказался близким к -5/3 (а не -3 или больше, как следует из теории двумерной турбулентности) в высокочастотной (мезомасштабной) части спектра (≈10-500 км). На бо́льших же масштабах эти распределения характеризовались законом k^{-3} , где k – волновое число. Внутренние гравитационные волны порождают анизотропные неоднородности температуры в устойчиво стратифицированных слоях атмосферы в диапазоне вертикальных масштабов от нескольких метров до нескольких километров. Из-за действия сил плавучести вертикальное направление при наличии плотностной (в частности, температурной) стратификации оказывается выделенным, в то время как в горизонтальной плоскости поле температурных неоднородностей на масштабах, не превышающих 100 км, можно считать локально изотропным [7]. Многочисленные экспериментальные исследования вертикальных спектров температуры показали, что в широком диапазоне значений вертикальных волновых чисел k_z они подчиняются закону степени "-3".

В публикации Гурвича и Чунчузова [8] предложена модель трехмерного спектра температурных неоднородностей, генерируемых внутренними гравитационными волнами в атмосфере. Согласно этой модели, вертикальный спектр описывается степенным распределением с показателем "-3", а горизонтальный спектр имеет три степенных асимптотических участка, два из которых подчиняются закону степени "-3", а промежуточный характеризуется показателем, меняющимся от -1 до -3 в зависимости от скорости уменьшения анизотропии при увеличении вертикального размера температурных неоднородностей. В статье Гурвича и Кухарца [7] приведены результаты экспериментальных исследований пространственных наклонных и вертикальных спектров флуктуаций температуры в устойчиво стратифицирован-

ной тропосфере на высотах 2–8 км (полеты проводились над северными районами европейской части России) и в диапазоне волновых чисел от 5 × 10^{-4} до 3 × 10^{-2} рад/м. Количественные оценки параметров этих спектров, рассчитанных по данным натурных измерений, свидетельствуют о том, что крупномасштабные (с вертикальным масштабом больше сотни метров) температурные неоднородности сильно вытянуты вдоль поверхности Земли (горизонтальные размеры превышают вертикальные примерно в 20 раз). Анизотропия неоднородностей убывает при уменьшении их вертикальных размеров, достигая значений 1.5–2 на масштабах порядка 10 м и меньших.

Атмосферную макротурбулентность можно охарактеризовать несколькими ключевыми масштабами. Первый из них – это масштаб подкачки энергии в систему. Принято считать, что основная энергия поступает в систему за счет реализации бароклинной неустойчивости, т.е. в области наиболее неустойчивых по Ляпунову длин волн. Вторым важным масштабом в теории турбулентности является масштаб длин волн, на котором происходит диссипация энергии. Строго говоря, в атмосфере диссипация энергии осуществляется на масштабе Колмогорова – ничтожно малом по своей величине для крупномасштабной турбулентности. Для макротурбулентности следует выделить промежуточные масштабы, на которых происходит сток энергии. В первую очередь это относится к планетарному пограничному слою, где имеет место поток энергии от макромасштабов к масштабу Колмогорова.

В работе Пономарева и др. [9] на основе разложения по степеням дивергенции двумерного поля скорости получена приближенная система уравнений для описания квазидвумерных вязких течений несжимаемой жидкости с учетом диссипативных эффектов. Частным случаем этих уравнений является модель квазидвумерного течения с рэлеевским (линейным) трением. Показано, что трехмерный характер течения, проявляющийся в эффективном взаимодействии вихрей с горизонтальной и вертикальной осями, обуславливает нелинейный характер трения. В цитированной работе получена параметризация этого взаимодействия в квазидвумерных уравнениях с помощью нелинейного трения и проведено сравнение теоретических результатов с данными лабораторных экспериментов по возбуждению пространственно-периодического течения жидкости. В статье Пономарева с соавторами [10] проведено экспериментальное исследование вихревого течения, создававшегося магнитогидродинамическим способом в тонком слое вращающейся жидкости на лабораторной установке, разработанной в Институте физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН. Для интерпретации результатов эксперимента развит аналитический подход, позволивший сделать вывод, что циркуляция в вертикальной плоскости определяет механизм нелинейного трения, приводящий к перераспределению циклонических и антициклонических вихрей вне пограничного слоя.

Двумерные турбулентные движения относятся к классу тех физических процессов, исследование которых не упрощается с уменьшением размерности пространства. Характерной особенностью двумерной турбулентности является передача энергии от мелкомасштабных движений к крупномасштабным. В дополнение к колмогоровскому участку спектра с законом $k^{-5/3}$ вследствие закона сохранения энстрофии (в отсутствие вязкости) должен существовать спектральный диапазон, подчиняющийся закону степени "-3".

В работе Цескиса [11] для описания свойств двумерного турбулентного движения несжимаемой жидкости использовано уравнение Кармана-Ховарта для корреляционной функции $B_{LL}(r) = u_L(x)u_L(x+r)$, где u_L – проекция скорости на прямую, соединяющую точки x и x + r, а черта сверху означает статистическое усреднение. Особое внимание в работе уделено выбору функции *T*(*k*), связанной с нелинейными слагаемыми в уравнениях движения и характеризующей поток энергии в k-пространстве. Предположено, что число пересечений этой функции с осью k должно совпадать с числом квадратичных законов сохранения. В трехмерном случае квадратичный интеграл только один и однократное пересечение Т с осью волновых чисел подтверждается экспериментальными данными. Такой подход позволил описать обратный каскад энергии, а также образование когерентных структур вследствие достижения спектром формы δ-функции. Когерентные структуры, представляющие собой ограниченные замкнутыми линиями тока вихревые образования, препятствуют распространению захваченной ими примеси, что не позволяет использовать классические теории турбулентной диффузии.

В статье Гледзера [12] рассмотрена проблема устойчивости зонального осесимметричного решения системы квазигеострофических уравнений динамики атмосферы в гидростатическом приближении с линейным трением и радиационным ньютоновским выхолаживанием. При этом внешнее воздействие на атмосферу задается фоновым горизонтальным градиентом температуры. Основным параметром, который определяет характер неустойчивости режима типа Хэдли, является число Рэлея Ra. Установлено, что для больших значений Ra и малых величин некоторого параметра τ_{ϕ} , имеющего размерность времени и характеризующего относительную роль эффектов вращения Земли, это обычная бароклинная конвективная неустойчивость, в то время как для малых Ra и больших времен τ_{ϕ} – центробежная неустойчивость.

В рамках также квазигеострофического приближения в статье Калашника [13] исследована проблема устойчивости течения стратифицированной вращающейся жидкости с постоянными вертикальными и горизонтальными сдвигами скорости как один из вариантов задачи Иди [14]. Для решения этой задачи использован подход, основанный на описании динамики возмущений в движущейся вместе с потоком системе координат. В статье показано, что учет меридионального сдвига скорости зонального геострофического течения приводит к качественному изменению динамики волн Иди (волновых решений задачи с нулевой потенциальной завихренностью), проявляющемуся в чередовании стадий гладкого осциллирующего во времени поведения со стадиями экспоненциального (взрывного) роста конечной продолжительности. Наряду с динамикой отдельных волн Иди в статье [13] исследован процесс генерации этих волн начальным возмущением, заданным отдельной пространственной Фурье-гармоникой, в результате которого возбуждаются немодальные волны с изменяющимися во времени горизонтальными и вертикальными волновыми числами и потенциальной завихренностью, отличной от нуля.

Исследование динамики струйных течений стратифицированной жидкости принадлежит к числу фундаментальных проблем гидродинамики. В работе Дружинина [15] изучается развитие неустойчивости таких течений с помощью прямого численного моделирования. Рассматривается изначально цилиндрическая струя с гауссовым профилем скорости в устойчиво стратифицированной (с линейным профилем плотности) среде. При задании исходного малого возмущения поля скорости с широким спектром происходит экспоненциальный рост выделенной квазидвумерной моды. При этом спектральный максимум, связанный с данной модой, смещен в сторону меньших волновых чисел по сравнению с максимумом неустойчивой спиральной моды нестратифицированной струи. Инкремент неустойчивости оказывается пропорциональным \sqrt{Ri} , где Ri = $= g\Delta\rho L/\rho U^2$ – глобальное число Ричардсона (здесь g – ускорение силы тяжести, ρ – характерное значение плотности жидкости, $\Delta \rho$ – изменение плотности по вертикали на масштабе L). В процессе развития неустойчивости образуется вихревая структура течения, состоящая из разнополярных квазидвумерных вихрей, располагающихся в горизонтальной плоскости вблизи оси струи, и сопровождающаяся излучением внутренних волн. На достаточно больших временах рост неустойчивости "насыщается" и затем флуктуации скорости и плотности затухают под действием вязких сил.

Для вращающейся стратифицированной жидкости в поле силы тяжести характерно наличие инерционно-гравитационных волн, которые в горизонтально неоднородных сдвиговых течениях могут быть захвачены внутри слоя сдвига. С такими локализованными волнами часто связывают наблюдаемую интенсивную волновую деятельность в районах атмосферных фронтов и струйных течений. Статья Калашника [16] посвящена теоретическому анализу структуры захваченных симметричных возмущений, в результате которого показано, что расположение области захвата определяется вертикальной плотностной стратификацией атмосферы. Если (в Северном полушарии) характерная частота Вяйсяля-Брента N = $= (-g/\rho \partial \rho/\partial z)^{1/2}$ больше (меньше) инерционной частоты *l*, то захват происходит в области антициклонического (циклонического) сдвига скорости и при этом частоты захваченных волн меньше (больше) *l*.

В работе Калашника и Вишератина [17] рассматривается режим циклострофического баланса (баланса между градиентом давления и центробежной силой), характерный для динамики интенсивных атмосферных вихрей, таких как смерчи и торнадо. В этой статье для описания движений в ядре осесимметричного вихря найден класс точных автомодельных решений уравнений газовой динамики: для компонент скорости - линейно зависящих от расстояния до оси, а для температуры – квадратично. Показано, что при небольших нарушениях состояния циклострофического баланса в ядре вихря возникают колебания термогидродинамических полей с частотой, пропорциональной угловой скорости его вращения. Такие колебания можно рассматривать как источник зарегистрированного в наблюдениях инфразвукового излучения от смерчей. Если же начальные отклонения от состояния баланса достаточно велики, то колебания являются ангармоническими и в условиях превалирующей центробежной силы приводят к значительному падению температуры на оси вихря.

В настоящее время большое внимание уделяется анализу устойчивости динамических систем на основе подхода, связанного с использованием характеристических показателей Ляпунова. Если параметры среды имеют случайный характер, то возникает стохастичность в физических полях. Усреднение этих полей по ансамблю случайных параметров сглаживает качественные особенности отдельных реализаций. При этом статистические средние, характеризуя "глобальные" масштабы области реализации стохастических процессов, зачастую ничего не говорят о деталях их развития внутри нее. Однако существуют физические процессы, происходящие с вероятностью единица, называемые когерентными [18] и такая "статистическая когерентность" может рассматриваться как некая организация сложной динамической системы со статистически устойчивыми характеристиками.

В приложении к стохастическим динамическим системам показатели Ляпунова усредняются по ансамблю реализаций случайных параметров. В публикации Кляцкина [19] показано, что полученные таким образом средние величины совпадают с кривой типичной реализации для логнормального распределения положительных нестационарных во времени характеристик решений стохастических динамических систем. Хотя полная статистика содержит всю информацию о динамической системе, на практике удается исследовать лишь некоторые простейшие статистические характеристики, связанные с одновременными и одноточечными распределениями вероятностей. Существуют методы статистической топографии (см., например, [20]), позволяющие на основе такого рода информации о системе описать основные количественные и качественные особенности поведения отдельных ее реализаций. В работе [19] методы статистической топографии применены к задаче статистического описания диффузии и кластеризации частиц и поля концентрации пассивной примеси в случайных гидродинамических потоках.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОГНОЗ ПОГОДЫ

Известно, что в последние пять десятилетий важнейшие межгодовые и декадные различия в режимах погоды в средних широтах Северного полушария обусловлены фазами Североатлантического колебания (САК). В эти же десятилетия в этих же широтах наблюдались экстремально большие аномалии температуры воздуха в слое от поверхности Земли до высот средней тропосферы. Диагностические расчеты [21] показали, что они не связаны с экстремальными аномалиями притоков тепла. Часто такие аномальные явления объясняют усилением планетарных волн или относят на счет блокирующих антициклонов.

В работах Курбаткина [22] и Курбаткина и Смирнова [23] представлены результаты анализа

доминирующих мод низкочастотной изменчивости атмосферы, механизмов формирования аномалий годового хода и внезапных аномалий планетарного и континентального масштабов. С этой целью использованы данные реанализа NCEP/NCAR за период 1959-1998 гг. и результаты оперативного объективного анализа Гидрометцентра России за 2002-2007 гг. В статье [22] особое внимание уделено роли межгодовых зимних отрицательных аномалий температуры воздуха над континентами в стабилизации годового хода современного климата, наблюдавшейся в 50-60-е годы XX века. Показана также роль в ослаблении годового хода климата деформаций Североатлантического диполя в западно-восточную планетарную волну, наблюдавшихся в 1997 и 2007 гг.

Работа [23] посвящена исследованию причин и механизмов образования экстремально больших аномалий температуры тропосферы как связанных с Североатлантическим колебанием. Использованный в работе подход базируется на том, что в годовом цикле температурные тропосферные аномалии континентального масштаба могут как усиливаться (в ответ на прямое воздействие притоков тепла), так и ослабевать (при температурной адвекции, противоположной по знаку притоку тепла). В цитированной работе по среднемесячным данным реанализа NCEP/NCAR за период 1959–1998 гг. изучены сезонные аномалии температуры воздуха на уровне 850 гПа (Т₈₅₀) в Евразии. Показано, что отрицательная (положительная) фаза САК зимой благоприятна для сохранения в это время года отрицательных аномалий Т₈₅₀ на востоке (западе) континента. Однако эта зависимость критически нарушалась (в силу ограниченного влияния САК на Т₈₅₀) примерно за два года до наступления экстремального явления. В цитированной статье рассмотрен механизм аномального притока тепла как источника усиления отрицательных аномалий T₈₅₀ зимой и положительных - летом, ограничивающего влияние доминирующей линамической молы на определенные регионы континента. В частности, демонстрируется посезонное "отключение" аномалий от механизма притока тепла под действием больших изменений САК и полное разрушение годового цикла аномалий.

Большой интерес исследователей вызывают механизмы взаимодействия стратосферы и тропосферы в слое, который состоит из верхней тропосферы и нижней стратосферы. Динамически этот слой определяется как слой, в котором изэнтропические поверхности не лежат целиком в стратосфере и не пересекают поверхность Земли. В зимний период крупномасштабные меандры тропосферной струи распространяются вверх и

разрушаются на уровне стратосферной струи, в результате чего происходит торможение стратосферной струи. В работе Боровко и Крупчатникова [24] исследуется один из аспектов влияния стратосферы на тропосферу. С помощью модели общей циркуляции атмосферы с простым механизмом нагревания, заданным в форме Ньютона, изучается чувствительность динамики тропосферы к вариациям интенсивности полярного вихря в стратосфере. Показано, что вариации термической стратификации в стратосфере вызывают заметные изменения циркуляции в тропосфере при усилении интенсивности полярного вихря в стратосфере: 1) смещается струя зонального потока в нижней тропосфере к полюсу; 2) падает приземное давление в полярной области; 3) уменьшается вертикальная компонента потока волновой активности из тропосферы в стратосферу; 4) динамическая реакция тропосферы на усиление стратосферного полярного вихря хорошо коррелирует с положительной фазой Североатлантических колебаний. В цитированной статье также показано, что зонально-симметричная компонента реакции нижней тропосферы на возмущения полярного вихря в стратосфере может быть результатом действия бароклинных волн синоптического масштаба даже в отсутствие стационарных планетарных волн.

Высота тропопаузы и термическая стратификация тропосферы определяются из динамического баланса между радиационными процессами и динамическими (бароклинными) потоками энтропии (тепла). Вопрос о том, как динамические и радиационные процессы взаимодействуют для поддержания статической устойчивости (средний вертикальный градиент потенциальной температуры) и среднего меридионального градиента потенциальной температуры, все еще остается открытым. В работе [25] показано, что изменение температурной стратификации при усилении выхолаживания в стратосфере оказывает влияние на верхний слой тропосферы, где стратификация определяется радиационными процессами. В нижних слоях тропосферы, где значительный вклад в динамику вносят бароклинные нестационарные вихри, локальный наклон изэнтропических поверхностей остается неизменным и согласуется с теоретической оценкой, полученной на основе теории бароклинной турбулентности для двухслойной модели атмосферы.

Одним из климатических процессов, имеющих глобальное значение, являются квазидвухлетние колебания (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере на высотах примерно 16–50 км. Это явление может быть описано как медленно распространяющиеся вниз западная и восточная фазы зонального ветра, сменяющие друг друга с периодом около 28 месяцев. Основной механизм воздействия КДК на динамику атмосферы связан с модуляцией переноса (в основном, стационарными волнами) волновой активности во внетропической стратосфере, что может приводить к внезапным стратосфере, что может приводить к внезапным стратосферным потеплениям [26] и к взаимодействию КДК с другими низкочастотными процессами, например, с Эль-Ниньо [27]. Отмечены и региональные связи КДК с процессами в тропиках, в частности, с длительностью сезонных дождей и активностью ураганов в Атлантике [28].

Несмотря на всю значимость КДК, лишь немногие климатические модели в настоящее время способны воспроизводить это явление (см., например, [29]). В идеале глобальная модель общей циркуляции атмосферы должна воспроизводить взаимодействие всего спектра экваториальных волн с зональным ветром в стратосфере. Возникает вопрос, каким требованиям должна удовлетворять модель, чтобы КДК воспроизводились. Основная трудность решения этого вопроса заключается в реализации сложного механизма формирования КДК, связанного с нелинейным взаимодействием среднего зонального потока и вертикально распространяющихся волн различного масштаба. Данная проблема исследована в цикле работ [30-33], выполненных в 2007-2010 гг. в Институте вычислительной математики РАН (ИВМ PAH).

В первой из публикаций этого цикла (статья Кулямина с соавторами [30]) рассмотрены два механизма формирования КДК, один из которых связан с обрушением коротких гравитационных волн, а другой представляет собой взаимодействие длинных волн с зональным потоком. Такое разделение важно с точки зрения разработки климатических моделей, в которых генерация крупномасштабных волн воспроизводится явно, а эффекты гравитационных волн, имеющих подсеточный масштаб, параметризуются. Формирование КДК на базе механизма взаимодействия планетарных экваториальных волн с зональным потоком в экваториальной стратосфере исследовано в цитированной статье с помощью простой малопараметрической модели эволюции зонально-осредненной компоненты скорости ветра [34]. С помощью численных экспериментов показано, что данный механизм требует высокого модельного разрешения (с шагом менее 500 м по вертикали), поскольку критические слои, в которых происходит основное взаимодействие, имеют малый вертикальный масштаб. Естественно, что это условие является необходимым требованием для воспроизведения КДК и в моделях общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Вместе с тем

результаты экспериментов с малопараметрической моделью Пламба показали, что этого механизма в глобальных моделях недостаточно для возбуждения реалистичных КДК и необходимо учитывать весь спектр волновых движений на экваторе. Поскольку для моделей достаточно грубого разрешения процессы распространения гравитационных волн происходят на подсеточном масштабе, механизм их взаимодействия задавался в работе [30] с помощью параметризации [35], выбор которой обусловлен ее использованием в климатической модели ИВМ РАН. Оказалось, что механизм обрушения гравитационных волн самодостаточен для возбуждения колебаний зонального экваториального ветра в верхней атмосфере и при определенном выборе параметров модели возникают реалистичные КДК.

Таким образом, основным результатом цитированной статьи является совместная малопараметрическая модель, позволяющая охватить весь спектр экваториальных волн и объединяющая оба механизма формирования КДК (через взаимодействие среднего течения с длинными волнами и через обрушение коротких гравитационных волн). При этом ключевую роль в становлении периода КДК и амплитуды в нижних слоях атмосферы играют планетарные волны, в то же время короткие гравитационные волны переносят энергию и определяют характеристики КДК в ее верхних слоях. Этот подход был использован в работе Кулямина и др. [31] для построения модели общей циркуляции атмосферы, воспроизводящей реалистичные КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере. С этой целью в качестве основы была взята разработанная в ИВМ РАН модель с горизонтальным разрешением 2° по широте и 2.5° по долготе, но достаточно грубым разрешением в 39 уровней по вертикали. При стандартных значениях параметров эта модель не воспроизводит КДК в экваториальной стратосфере, однако воспроизводит полугодовые колебания (ПГК) в верхней стратосфере и мезосфере. Модификация данной модели за счет увеличения количества уровней до 80 и выбора вертикального шага сетки в стратосфере, равного примерно 0.5 км, позволила успешно воспроизвести в численных экспериментах КДК и ПГК с характеристиками, близкими к наблюдаемым.

Проблема формирования периода КДК, его устойчивости и связи с полугодовой и годовой гармониками исследована в работах Кулямина и Дымникова [32] и Дымникова и Кулямина [33]. С этой целью были использованы данные реанализов наблюдений NCEP/NCAR и ERA40, а также результаты численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН. Аналитические оценки и результаты численных экспериментов с малопараметрическими моделями показали наличие сильной синхронизации к кратным периодам ПГК в верхней атмосфере (в переходной от КДК к ПГК области) и слабой синхронизации в нижних слоях области распространения КДК. При этом возможность синхронизации с ПГК или годовым циклом реализуется как для механизма поглощения длинных волн средним потоком, так и в процессе обрушения коротких гравитационных волн. Это позволяет рассматривать КДК, ПГК и годовой цикл как единую систему колебаний в циркуляции верхней экваториальной атмосферы. Модель ОЦА ИВМ РАН успешно воспроизвела основные спектральные характеристики КДК и ПГК и наблюдаемые особенности изменчивости периода КДК. Существенным обстоятельством при этом оказывается параметризация эффектов внутренних гравитационных волн и связанной с ними вертикальной диффузии, при вариации уровня которой могут возникать КДК с периодами от 12 до 36 мес.

Известно, что крупномасштабная циркуляция атмосферы над Сибирским регионом имеет ряд особенностей, которые обусловлены географическим положением (протяженность континента, влияние Северного Ледовитого океана), особенностями подстилающей поверхности и рельефа. Исследованию циркуляции атмосферы над Сибирью посвящены работы [36, 37], в которых рассматривается динамика циклонов и антициклонов над Западной Сибирью за период 1976–2006 гг. С этой целью использованы приземные синоптические и высотные карты и данные реанализа NCEP/DOE AMIP II, позволившие исследовать траектории перемещения барических образований, а также рассчитать количество образований различного генезиса.

Динамические процессы, влияющие на существование, интенсивность и длительность атмосферных блокирующих режимов (блокингов), постоянно находятся в поле внимания исследователей. В целом считается, что блокинги являются результатом взаимодействия между усиливающимися волнами синоптического масштаба, переносящими антициклоническую завихренность в область блокирования, и квазистационарной волны планетарного масштаба. При анализе изменчивости атмосферной циркуляции выделяют короткопериодные (с временными масштабами 2-6 суток) и низкочастотные (продолжительностью более 10 суток) процессы. При этом максимумы низкочастотной изменчивости расположены в областях с максимальной повторяемостью блокирующих ситуаций [38]. Особый интерес представляет жизненный цикл атмосферных блокингов, в частности, стадия их разрушения. В работе Лупо и др. [39] проведен анализ трех блокирующих событий в Южном полушарии над Тихим океаном в холодные сезоны. На основе анализа фазовых траекторий показано, что резкие изменения крупномасштабной структуры атмосферных течений могут приводить к быстрому распаду блокинга. В статье предложены четыре различных сценария такого распада: при ослаблении синоптической "подпитки", при высокой активности синоптических процессов, а также каждый из отмеченных режимов во взаимодействии с резкими изменениями характера планетарного течения.

Прогресс, имевший место в последние десятилетия в развитии моделей общей циркуляции атмосферы, и успехи в технологиях усвоения спутниковых данных наблюдений обусловили интерес исследователей к проблеме воспроизведения и прогноза сезонных аномалий климата. В рамках Всемирной программы по изучению климата Всемирной метеорологической организации инициированы проекты, посвященные сравнению моделей атмосферы по отношению к воспроизведению сезонных климатических аномалий. В статье Толстых и др. [40] приведены результаты воспроизведения атмосферной циркуляции на сезонных временных масштабах с помошью глобальной полулагранжевой модели, разработанной в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России. С помощью этой модели выполнены расчеты ансамблей ретроспективных сезонных прогнозов (за 25 лет для каждого из сезонов) на основе данных реанализа NCEP/NCAR в рамках протокола международного эксперимента SMIP-2/HFP, нацеленного на оценку практической предсказуемости на сезонных временных масштабах. Проведен сравнительный анализ естественных ортогональных составляющих, рассчитанных для основных сезонов по модельным данным и данным реанализа ЛЛЯ геопотенциала поверхности 500 гПа и давления на уровне моря, показавший их вполне удовлетворительное согласие.

В статье Климовой с соавторами [41] описана методика оценки статистической структуры ошибок краткосрочного прогноза поля температуры в пограничном слое атмосферы для целей объективного анализа. Численные эксперименты по оценке ковариаций ошибок прогноза проводились для модели WRF (Weather Research and Forecast, NCEP, USA). В цитированной статье излагаются результаты численных экспериментов по оценке обсуждаемых ковариаций в пограничном слое атмосферы в зависимости от его устойчивости для летнего и зимнего периодов. Показано, что дисперсия и вертикальный радиус корреляции ошибок прогноза поля температуры, а также поведение трехмерных ковариационных функций в пограничном слое атмосферы существенно различаются при различном характере устойчивости.

Для организации взаимодействия между прогностическими моделями и данными эффективным является подход, базирующийся на вариационных принципах с использованием методов усвоения и комбинации основных и сопряженных задач для моделей процессов. К настоящему времени развиты два направления. К первому направлению можно отнести оптимизационные методы, ведущие свое начало от метода взвешенных наименьших квадратов (метод Сасаки и фильтр Калмана). Второе направление базируется на классическом вариационном принципе Лагранжа с применением сопряженных задач.

Известно, что для линейной динамики оптимальным методом последовательного усвоения данных является фильтр Калмана (ФК). Однако в случае нелинейных моделей большой размерности, реализация ФК встречает серьезные трудности. Во-первых, если динамическая модель имеет вектор состояния размерности N, то матрица ковариаций ошибок имеет уже размерность N^2 . Это требует хранения больших массивов данных и большого числа вычислений. Во-вторых, для применения ФК с нелинейной динамикой требуется линеаризация для получения уравнения эволюции ковариации ошибок. Это вносит ошибки в прогноз ковариаций, которые в неустойчивом случае могут расти. Использование схем высокого порядка замыкания делает это метод практически неприменимым в задаче усвоения данных. Поэтому в последнее время широкое распространение получил другой метод последовательного усвоения данных – ансамблевый фильтр Калмана (АФК), позволяющий снять ограничения детерминированного ФК.

В работах Климовой [42, 43] предложены методы усвоения данных наблюдений, основанные на идеях АФК в предположении, что случайные ошибки прогноза обладают свойством эргодичности. В этом случае получается алгоритм, при котором вероятностное осреднение заменяется на осреднение по времени (π -алгоритм). Автором исследована применимость π -алгоритма в задаче усвоения данных на примере простого одномерного уравнения позволило сравнить данный алгоритм с классическим алгоритмом фильтра Калмана и рассмотреть различные подходы его практической реализации.

В статье Пененко [44] предложены новые методы вариационного усвоения данных и сформулированы обратные задачи для идентификации параметров моделей. Явное включение неопределенностей требует регуляризации по Тихонову. Для этих целей в формулировку вариационных принципов вводятся функционалы, выражающие суммарную меру неопределенностей. Автор отмечает, что при такой организации методов усвоения данных обратные связи от данных к моделям включаются на всем интервале усвоения. Это новый принципиальный элемент методики, поскольку в традиционных методах усвоения обратная связь включается, как правило, только в начальный момент времени "окна" усвоения. Для практических применений большой интерес представляют методы последовательного усвоения данных в реальном времени. Здесь окно усвоения равно шагу дискретизации модели по времени, и алгоритм реализуется без итераций. Для дискретизации моделей и функционалов используются аддитивно-усредненные схемы расщепления и дискретно-аналитические монотонные схемы для конвективно-диффузионных операторов. Для реализации этих схем предлагаются алгоритмы с параллельной организацией вычислений.

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Полярные мезомасштабные циклонические вихри, образующиеся в холодный сезон над свободной ото льда морской поверхностью, представляют собой яркую особенность атмосферной циркуляции в верхних широтах. Их характерный размер меняется от нескольких десятков до нескольких сотен километров. В работе Мохова с соавторами [45] полярные мезоциклоны проанализированы с помощью данных из архива изображений 253 вихревых образований, обнаруженных над акваторией Северо-Европейского бассейна, Баренцова и Карского морей за период с 1981 по 1995 гг. Несмотря на то, что имеются значительные межгодовые вариации параметров этих циклонов, существенных климатических трендов не выявлено. Оказалось также, что кумулятивное распределение повторяемости арктических мезоциклонов над рассмотренным регионом может быть достаточно хорошо аппроксимировано экспоненциальной функцией в диапазоне размеров от 50 до 400 км.

В настоящее время довольно большое внимание уделяется проблеме тропических циклонов в связи с наблюдающимися изменениями климата: увеличится ли их число и интенсивность в более теплом климате? Любопытным здесь обстоятельством является тот факт, что тропические циклоны возникают лишь при температуре поверхности океана T_s не ниже 26°С. В работах Голицына [46, 47] тропические циклоны, а также полярные мезоциклоны со "взрывным" (в течение нескольких часов) развитием рассмотрены как единые гидродинамические структуры в форме интенсивных вихрей, возникающие над океаном в атмосфере вращающейся планеты. Источником энергии для таких вихрей является верхний слой океана, причем атмосфера должна быть холоднее поверхностных вод и не насыщена влагой до 100%. В полярных регионах океан отдает свое тепло в виде потока явного тепла, а в тропиках основную роль играет поток скрытого тепла. В цитированных статьях Г.С. Голицына использованы соображения теории подобия и размерности с тем, чтобы на основе климатологических данных, аэродинамических формул для приводного слоя и масштаба скорости конвекции во вращающейся жидкости оценить потоки плавучести, а также раздельно потоки явного и скрытого тепла. Оказалось, что в тропиках при ураганных ветрах $U \ge 33$ м/с и климатологической влажности воздуха 80% суммарный поток тепла при температуре водной поверхности $T_s \ge 26^{\circ}$ С становится близким, а то и превышающим значение 700 Вт/м². В силу уравнения Клазиуса-Клапейрона при меньших значениях T_s поток скрытого тепла в атмосферу существенно уменьшается. Для проникновения конвекции выше пограничного слоя наряду с интенсивными потоками плавучести должны иметь место существенно ослабленная статическая устойчивость атмосферы и отсутствие заметных сдвигов ветра по высоте. В полярных регионах для образования взрывных мезоциклонов полные потоки тепла должны быть примерно вдвое большими, чем в тропиках в силу существенно меньшей роли скрытого тепла, большей геострофичности и большей устойчивости атмосферы.

Согласно современным представлениям, одним из возможных механизмов формирования регулярных и квазирегулярных вихревых цепочек синоптического масштаба (циркумполярных циклонов и антициклонов, в частности) является неустойчивость баротропных волн Россби. В работе [48] показано, что в зависимости от параметров циркумполярного струйного течения в процессе реализации баротропной неустойчивости устанавливается периодический, квазипериодический или хаотический режим генерации планетарных волн. Важной проблемой при этом является хаотическая адвекция и диффузия частиц пассивной примеси в цепочках вихрей.

Работа Шагалова с соавторами [49] посвящена исследованию генерации спектрально узких пакетов волн Россби и порождаемых ими вихревых цепочек в зональном течении со сдвиговым профилем скорости. Для анализа использован асимптотический подход, базирующийся на выделении узкого критического слоя, в котором происходит формирование вихревых цепочек. Показано, что развитие вторичной неустойчивости приводит при увеличении надкритичности сначала к лагранжеву хаосу (возникает хаотическое движение частиц), а затем (при дальнейшем ее росте) к хаотизации поля завихренности. Исследовано также движение частиц пассивной примеси в условиях установившихся самосогласованных режимов генерации волн Россби и сопутствующих им хаотически модулированных вихревых цепочек. В цитированной статье показано, что при увеличении надкритичности возникает так называемая аномальная диффузия, которая по сравнению с обычной диффузией приводит к более эффективному распространению примесей вдоль цепочек баротропных вихрей.

В многочисленных экспериментальных исследованиях диффузии примеси в турбулентной атмосфере отмечается существенный вклад упорядоченных (конвективных) потоков в суммарный вертикальный перенос (см., например, обзор в статье [50]). В работе Кухарца и др. [51] теоретически исследован вертикальный перенос пассивной примеси в среде при наличии как турбулентного, так и конвективного перемешивания. Показано, что имеет место эффект взаимного влияния турбулентного и конвективного механизмов переноса. Этот эффект проявляется, в частности, в том, что наличие конвекции ослабляет турбулентный перенос, что связано с "захватом" частиц примеси вихревыми структурами, и приводит к его анизотропии даже в изотропном турбулентном поле скоростей.

В работах Горбатенко и Константиновой [52] и Константиновой и Горбатенко [53] исследованы особенности конвекции над Сибирью в связи с опасными явлениями погоды. Основная цель таких исследований состоит в том, чтобы разработать метод оценки вероятности развития мезомасштабной конвекции до опасных явлений погоды. В цитированных публикациях выполнен анализ временной и пространственной изменчивости параметров, характеризующих конвекцию по ряду признаков: температурная стратификация, влагосодержание нижних слоев атмосферы, ее энергетический потенциал и резкие изменения характеристик ветра с высотой. Для изучения конвекции и опасных явлений погоды, обусловленных ее развитием, использованы данные о состоянии атмосферы, получаемые с помощью аэрологического зондирования атмосферы. В статье Анановой и др. [54] для изучения конвективной облачности, наряду с традиционными данными наблюдений, в рассмотрение включены радиолокационные характеристики облачности при шквале на юго-востоке Западной Сибири. Исследованы повторяемость максимальной высоты кучево-дождевой облачности при наличии шквала, высота нулевой изотермы, радиолокационная отражаемость на трех уровнях и максимальная отражаемость, комплексный критерий грозоопасности. Определены значения радиолокационных характеристик облачности при шквалах при различных синоптических ситуациях.

Лесные пожары существенно влияют на газовый и аэрозольный состав атмосферы и ответственны за заметные региональные изменения природной среды, а также могут воздействовать на здоровье людей. Кроме того, выбрасываемые в атмосферу в большом количестве аэрозоли способствуют образованию облачности и тем самым влияют на циркуляционные процессы. В работе Алояна [55] для исследования атмосферной циркуляции при лесных пожарах использована региональная гидродинамическая модель, основанная на совместном решении задач динамики атмосферы во влажной атмосфере и кинетических процессов конденсации и коагуляции. Особое внимание в статье уделено описанию конвективных процессов с учетом потока тепла из зоны горения. Показано, что выделение тепла конденсации приводит к увеличению высоты подъема сажевых частиц.

Влияние мегаполиса на температурный режим атмосферного пограничного слоя проявляется, в частности, в том, что над городом формируется так называемый "остров тепла", существование которого подтверждено данными измерений на метеорологических мачтах и телевизионных башнях, а также с помощью баллонного радиозондирования на пригородных аэрологических станциях. В работе Кадыгрова и соавторов [56] проведен анализ данных измерений температуры, выполненных с помощью микроволнового радиометра на трех площадках, одна из которых расположена в центре Москвы (мегаполис), а две другие за ее пределами – в г. Долгопрудный (пригород) и на Звенигородской научной станции ИФА РАН (фон). Анализ данных измерений показал, что возмущения, вносимые мегаполисом в суточную и сезонную изменчивость температуры пограничного слоя атмосферы, затухают с высотой, но остаются статистически значимыми вплоть до высоты 600 м.

Основной особенностью задачи о качестве воздуха над городской неоднородной поверхностью является широкий спектр пространственно-временны́х масштабов, определяющих это качество процессов, среди которых можно выделить масштаб города (десятки километров), где происходит первичная эмиссия загрязнений воздуха, а также микро- и мезомасштаб, на которых формируются и рассеиваются вторичные загрязнители воздуха. Дисперсия загрязнений сильно зависит от структуры пограничного слоя атмосферы и его взаимодействия с фоновым течением и подстилающей поверхностью. Для численного моделирования такой системы, обладающей сильной нелинейностью, требуются модели турбулентности высокого пространственного разрешения, учитывающие химические трансформации загрязняющих веществ.

В связи с повышением интенсивности автодорожного движения, организации мелких производств с неконтролируемой эмиссией углеводородов, особую значимость для большинства городов России приобрела проблема загрязнения атмосферы формальдегидом. В работе Шлычкова с соавторами [57] предпринята попытка реконструкции полей концентрации формальдегида в г. Томске с помощью численной модели и с использованием данных наблюдений. Ветровой режим над орографически неоднородной территорией Томска и окрестностей определялся на основе диагностических расчетов по однослойной мезомасштабной модели, основные уравнения которой получены с помощью композиции статистических и гидродинамических методов и на основе гипотезы "вертикального" подобия гидродинамических полей в приземном слое. Для расчета распределения формальдегида по территории города использовалось трехмерное уравнение переноса и диффузии пассивной примеси. Проведенная калибровка параметров обеспечила адекватность расчетных характеристик данным измерений концентрации формальдегида на наблюдательных постах. Модель можно использовать для получения относительных оценок вклада отдельных предприятий или групп источников (в том числе выбросов автотранспорта) в общее загрязнение городской атмосферы, а также как компонент экспертных систем или систем поддержки принятия управленческих решений, в частности, при разработке профилактических мероприятий, способствующих повышению качества городского воздуха.

В статье Пененко с соавторами [58] описан комплекс моделей мезомасштабного переноса примесей, включающий детерминированную модель в эйлеровой постановке и детерминированно-стохастическую в рамках лагранжева подхода. Приведены результаты сравнительных экспериментов по моделированию переноса примеси в областях со сложной геометрией.

В цикле работ [59—61] представлены результаты комплексных корабельных исследований на оз. Байкал пространственного распределения аэрозольных полей с использованием средств лазерного зондирования и локального контроля. Обнаружено, что средние суммарные концентрации полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) над акваторией Байкала близки к фоно-

вым, а пространственное распределение весьма неоднородно. Из совместного анализа с двумерными пространственными лидарными разрезами аэрозольных полей выявлены характерные тенденции в пространственных флуктуациях этих величин. В дополнение к инструментальным исследованиям проведены модельные расчеты распределения ПАУ, основанные на численном решении пространственного нестационарного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примесей. Сопоставление с данными эксперимента показало, что в основном расчетные концентрации близки к измеренным значениям. Выполнен анализ концентраций оксидов азота, измеренных над акваторией Байкала летом 2005 г., в сопоставлении с метеорологическими условиями за этот же период. С использованием численной модели распространения и трансформации примесей выявлены области повышенного загрязнения соединениями азота в регионе оз. Байкал. Проведен анализ ситуации, связанной с распространением дымового шлейфа от лесных пожаров на северозападном побережье озера.

В статье Курбацкого [62] показано, что нелокальность механизма турбулентного переноса тепла в мезомасштабном пограничном слое над шероховатой поверхностью проявляется в виде ограниченных зон противоградиентного переноса тепла. Эти зоны выделены с помощью анализа статей баланса в уравнении для дисперсии температурных флуктуаций на основе вычисления коэффициентов турбулентного обмена импульса и тепла с привлечением модели "градиентной диффузии". При этом противоградиентный перенос тепла в локальных областях вызывается турбулентной диффузией или членом дивергенции тройной корреляции в уравнении баланса дисперсии температуры.

В последнее время все большее внимание уделяется исследованию процессов тепло- и массообмена между атмосферой и ландшафтно-неоднородной сушей с различными типами поверхности раздела двух сред. Традиционно используемые параметризации Монина-Обухова во многих случаях не дают удовлетворительного согласия с данными натурных экспериментов. Статья Панина и Бернхофера [63] посвящена анализу данных измерения составляющих теплового баланса над разными поверхностями суши, результаты которого свидетельствуют о том, что сумма потоков явного и скрытого тепла оказывается систематически меньше разности радиационного баланса и потока тепла в почву, причем дисбаланс увеличивается с ростом неоднородности ландшафта. Этот факт может свидетельствовать о важной роли внутренних пограничных слоев и связанных с ними атмосферных микроциркуляций в параметризации подсеточных эффектов в крупномасштабных моделях. В цитированной статье построены эмпирические формулы для коррекции измеренных или рассчитанных на основе аэродинамического метода турбулентных потоков тепла над естественными (неоднородными) поверхностями суши.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Одной из главных особенностей турбулентных течений в пограничном слое атмосферы (ПСА) является широкий пространственно-временной спектр турбулентных пульсаций, самые длинноволновые и низкочастотные из которых могут достигать размера нескольких километров и иметь временные масштабы в несколько часов. Важно также и то, что для пограничного слоя характерно образование долгоживущих крупномасштабных квазиупорядоченных структур (крупных термиков, имеющих вид близкий к шестиугольным ячейкам Бенара, конвективных валиков, спиралевидных протяженных вихрей различной природы), определяющих значительную часть интегрального переноса импульса, тепла и влаги. В турбулентном потоке среднее течение и флуктуации скорости во всем диапазоне масштабов находятся в непрерывном взаимодействии. При этом, как правило, даже при наличии квазиупрядоченных структур нельзя однозначно разделить течение на мелкомасштабные и крупномасштабные составляющие, поскольку спектр энергии флуктуаций скорости в турбулентных пограничных слоях не имеет выраженного минимума.

Вихреразрешающее моделирование (LES, Large Eddy Simulation – в англоязычной литературе) является мощным инструментом исследования нестационарной трехмерной динамики крупномасштабных вихревых структур в сдвиговых течениях (в том числе стратифицированных по плотности) при очень больших числах Рейнольдса Re ≥ 1 (в частности, порядка 10⁹ для пограничного слоя атмосферы). Важным обстоятельством разработки вихреразрешающих моделей является согласованный выбор параметризации мелкомасштабной турбулентности и численной схемы. Такого рода модель представлена в работах Глазунова [64, 65]. В ней используются пространственно-фильтрованные уравнения Навье-Стокса, смешанное локализованное турбулентное замыкание динамического типа и консервативная схема четвертого порядка точности. Существенная часть нелинейных взаимодействий в области больших (но все еще представимых на сетке модели) волновых чисел заменяется диссипативным слагаемым, что оправдано в случае преобладания прямого каскада энергии в трехмерном турбулентном потоке. Динамическое турбулентное замыкание автоматически регулирует сток кинетической энергии вихрей малого масштаба, так что данная модель не только воспроизводит структуру и энергию крупномасштабных составляющих турбулентного течения, но и позволяет оценить спектральную плотность энергии пульсаций скорости в области больших волновых чисел.

Было, однако, обнаружено, что в LES-моделях с явной фильтрацией прогнозируемый динамическим замыканием обратный каскад энергии определяется взаимодействиями разрешаемых пульсаций с близкими по масштабу "подфильтровыми" гармониками. Вместе с тем обратимость оператора фильтрации позволяет для любого момента времени получить из прогностической скорости ее "реконструированный" аналог, более точно отражающий мелкомасштабную структуру течения [65]. В этой работе модель была верифицирована с помощью ряда длительных численных экспериментов по воспроизведению турбулентных течений в канале, ограниченном по вертикали двумя одинаковыми бесконечно протяженными шероховатыми пластинами. Движение жидкости в канале поддерживалось за счет направленной вдоль его оси внешней силы, заданной постоянным градиентом давления. Результаты расчетов сравнивались с данными лабораторных экспериментов и результатами прямого численного моделирования (DNS, Direct Numerical Simulation). Показано, что апостериорная реконструкция моделируемого поля скорости обеспечивает существенно более точное воспроизведение статистических характеристик модельного решения.

Влияние вращения на интенсивность и структуру турбулентных пульсаций установлено довольно давно (см., например, в статье [66] экспериментальные данные, подтверждающие подавление или усиление турбулентности в сдвиговом пограничном слое в зависимости от направления вращения). В работе [67] проведена серия расчетов с LES-моделью нейтрально-стратифицированного верхнего слоя океана при различных направлениях вектора напряжения трения на поверхности, результаты которых показали сильную зависимость интенсивности турбулентных процессов от направления течения. При помощи вихреразрешающей модели пограничного слоя атмосферы в работе Глазунова [68] изучено влияние вращения Земли на структуру турбулентности и динамику квазиупорядоченных вихрей. Численные эксперименты для нейтрально-стратифицированного турбулентного слоя Экмана с большим размером расчетной области (21 км по обоим горизонтальным направлениям и 3 км по вертикали) и с шагом ~40 м (около 20 миллионов узлов конечноразностной сетки) позволили одновременно явно воспроизвести мелкомасштабную трехмерную турбулентность

и крупномасштабные валики размером в несколько километров. Установлено, что наличие меридиональной компоненты угловой скорости вращения Земли приводит к значительному усилению интенсивности флуктуаций скорости в нейтрально-стратифицированном турбулентном течении при восточном и северо-восточном ветре и ослаблению интенсивности флуктуаций при западном и юго-западном ветре. Это, в свою очередь, вызывает значимые изменения профиля средней скорости. Показано, что эти изменения связаны с самыми крупномасштабными флуктуациями, сравнимыми по масштабу с толщиной турбулентного слоя Экмана. Обнаружено, что в ограниченном по высоте нейтрально-стратифицированном ПСА и при его устойчивой стратификации зависимость от направления ветра существенно уменьшается.

С помощью вихреразрешающей модели в работе Глазунова с соавторами [4] исследована (с точки зрения воспроизведения спектральных свойств) термическая конвекции Рэлея–Бенара в двоякопериодическом канале с твердыми стенками как аналог многомасштабной атмосферной турбулентности. "Мезомасштабное" отношение его горизонтальных размеров к вертикальному (25.6 в обоих направлениях) обеспечило существование квазидвумерных крупномасштабных компонент течения, а размер равномерной расчетной сетки примерно в 42 миллиона узлов позволил явно воспроизвести динамику мелкомасштабной трехмерной турбулентной составляющей. Анализ результатов численных экспериментов показал, что конвекция начинается с мелкомаштабных, хаотически расположенных, всплывающих и опускающихся термиков, которые, объединяясь, образуют конвективные ячейки неправильной формы (в том числе и деформированные шестиугольные ячейки) примерно одинакового размера, сравнимого с расстоянием между стенками. Затем ячейки начинают сливаться между собой и укрупняться до тех пор, пока размер самых больших аномалий не достигает размера расчетной области модели. В каждый момент времени на фоне крупных ячеек наблюдаются мелкомасштабные аномалии.

Декомпозиция изучаемого турбулентного течения на баротропную и бароклинную составляющие позволила предложить следующую схему преобразований кинетической энергии в данной системе. Кинетическая энергия поступает в систему за счет преобразования доступной потенциальной энергии в бароклинную кинетическую на масштабе крупных термиков (через вертикальную компоненту скорости) и перераспределяется на том же масштабе через градиенты давления в бароклинные составляющие, определяемые горизонтальными компонентами скорости. За счет нелинейных взаимодействий и без существенной диссипации и генерации бароклинная энергия переносится в сторону мелких масштабов, формируя первый инерционный интервал со спектральным распределением, близким к закону $k^{-5/3}$ (к – волновое число). В интервале волновых чисел, связанных с близкими к вертикальному размеру расчетной области масштабами, происходит существенная перестройка поля бароклинных флуктуаций скорости, обеспечивающая преобразования энергии из баротропной в бароклинную и обратно с положительным в среднем вкладом в энергию осредненных по всей толщине слоя течений. Энергия баротропной компоненты распространяется от ее источника, в основном в сторону крупных масштабов, формируя спектральную зависимость вида $k^{-5/3}$, а также, в меньшей степени, в сторону мелких масштабов, что в результате каскада энстрофии приводит к распределению k^{-3} . Остаток бароклинной кинетической энергии, не преобразованный в баротропную составляющую, передается через прямой каскад нелинейных взаимодействий в сторону мелких масштабов, где и диссипирует (в случае вихреразрешающей модели за счет диссипативного вклада замыкания, а в случае реального турбулентного потока - за счет сил молекулярной вязкости).

В работе Герценштейна с соавторами [69] в приближении Буссинеска рассмотрены двумерные конвективные течения вязкой несжимаемой жидкости в бесконечно протяженном слое между двумя горизонтальными плоскостями при подогреве снизу. С этой целью в рамках нестационарных уравнений Навье-Стокса методом Бубнова-Галеркина проведено прямое численное моделирование этих течений. Задача рассмотрена в двух постановках, различающихся граничными условиями на горизонтальных границах. В случае так называемых "свободных" условий принимается обращение в нуль на горизонтальных границах вертикальной скорости, касательного напряжения трения и температуры. В постановке с "жесткими" условиями вместо равенства нулю касательного напряжения используется условия прилипания. Расчеты проведены для различных значений параметра надкритичности $r = Ra/Ra_{cr}$, где Ra = $= g\beta H^{3}\delta T/\nu\chi$ – число Рэлея (H – толщина слоя, δT – разность температур на границах этого слоя, β, ν, χ – коэффициенты теплового расширения, кинематической вязкости и температуропроводности), Ra_{cr} – критическое значение числа Рэлея, зависящее от типа задачи (равное 657.5 и 1708 соответственно). Особое внимание в работе уделено пространственным спектрам, рассчитанным для случаев высокой надкритичности (при *r* = 26000 в задаче со свободными граничными условиями) и относительно небольшой (при r = 6000 в задаче с жесткими условиями). В области малых волновых чисел спектры близки к колмогоровскому $k^{-5/3}$, а в коротковолновой ветви спектральной кривой формируется распределение, близкое к закону k^{-1} . Для кинетической энергии пульсаций в этой области выполняется спектральный закон k^{-3} . Такое "сосуществование" степенных законов k^{-1} и k^{-3} свидетельствует о наличии инерционного интервала прямого каскада энстрофии.

Процессы турбулентного взаимодействия атмосферы с поверхностью океана являются критически важными в теории тропических ураганов и полярных мезоциклонов. Одной из характеристик такого взаимодействия является коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности моря C_d . Традиционные аэродинамические формулы, полученные на основе обобщения экспериментальных данных для скоростей ветра менее 30 м/с, дают завышенные значения C_d при ураганных ветрах. В статье [70] на основе обобщения результатов измерений с помощью падающих внутри тропических циклонов GPS-зондов показано, что коэффициент сопротивления уменьшается, если скорость приводного ветра достигает величины 30-35 м/с. Возможными причинами такого эффекта могут служить как изменение формы морской поверхности в энергонесущих волнах, сопровождаемое возникновением резкого переднего фронта и отрывом атмосферного пограничного слоя [71], так и механизм, связанный с присутствием в потоке брызг, образующихся при срыве ветром гребней крутых волн [72, 73].

В работе Троицкой и Рыбушкиной [74] для определения коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности океана при ураганных ветрах предложена квазилинейная модель ветрового пограничного слоя, основанная на решении уравнений Рейнольдса с учетом эффектов вязкого подслоя. В рамках этой модели эффект снижения C_d при ураганных ветрах объясняется тем, что ветровая генерация волн вызывает передачу импульса от ветра к волнам, в результате чего турбулентное напряжение вблизи поверхности сильно снижается. Это приводит к уменьшению вихревой вязкости вблизи поверхности и деформации профиля скорости ветра. Сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментальных данных для широкого диапазона скоростей ветра позволил авторам цитированной выше статьи предложить простую параметризацию коэффициента сопротивления для использования в численных моделях прогноза ветра и волнения.

Одним из источников аэрозоля в атмосфере является поверхность суши, с которой при опре-

деленных условиях частицы почвы могут выноситься в атмосферу (например, при пыльных бурях и пылевыми смерчами). Экспериментальные данные и теоретические оценки свидетельствуют о том, что отрыв частиц от поверхности почвы может происходить за счет турбулентных напряжений трения в условиях, когда динамическая скорость превышает некоторое критическое значение (см., например, [75]). В работе Гледзера с соавторами [76] на основе данных натурных измерений в прикаспийской пустыне и оценок гидродинамических параметров в примыкающем к поверхности почвы вязком термическом слое получены асимптотические выражения для массовой концентрации мелкодисперсного аэрозоля. Предполагается, что вынос аэрозоля из почвы пропорционален скорости воздуха на уровне термического слоя, определяемой динамической скоростью и дефицитом температуры в этом слое. В качестве возможного механизма выноса аэрозоля в цитированной статье рассмотрена модель динамики воздуха в пористом слое почвы с привлечением закона Дарси.

В работах Курбацкого и Курбацкой [77, 78] представлены результаты исследования особенностей структуры устойчивого пограничного слоя над урбанизированной поверхностью. С этой целью разработана модифицированная трехпараметрическая модель турбулентности для термически стратифицированного атмосферного пограничного слоя, основанная на тензорно-инвариантных параметризациях для напряжения давления и корреляций между давлением и температурой. Турбулентные потоки импульса и тепла вычисляются с помощью явных алгебраических моделей, единым образом описывающих состояние конвективного перемешивания, устойчиво стратифицированный режим и переходы между ними. Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений и результатами других моделей показало, что предложенная модель способна воспроизводить наиболее важные особенности структуры турбулентности пограничного слоя над урбанизированной поверхностью, а также эффект ее шероховатости на глобальную структуру полей ветра и температуры над городом. В настоящее время общепризнано, что в устойчиво стратифицированных течениях атмосферного пограничного слоя турбулентное перемешивание существует при градиентных числах Ричардсона $\operatorname{Ri}_{g} \ge 1$ и обратное турбулентное чис-

ло Прандтля Pr_t⁻¹ убывает с увеличением термической устойчивости течения. В статье [79] показано, что упомянутая выше трехпараметрическая модель турбулентности, в которой учтен эффект стратификации в выражении для масштаба времени скалярного поля, способна воспроизвести известную из экспериментальных данных и результатов LES-моделирования зависимость числа Прандтля от числа Ричардсона и противоградиентный перенос тепла в сильно устойчивом пограничном слое.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КЛИМАТА И ЭКОЛОГИИ

В 2007-2010 гг. интенсивно развивалось направление, связанное с разработкой математической теории климата, 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. При этом понятие "климат" вводится как набор состояний, проходимых климатической системой за достаточно длительный интервал времени (на практике принимается 30 и более лет), а задача о глобальных и региональных изменениях климата трактуется как проблема чувствительности статистических характеристик решений системы уравнений, описывающих динамику реальной климатической системы. С математической точки зрения проблема чувствительности климата представляет собой задачу о чувствительности аттрактора климатической системы (множества состояний в фазовом пространстве, на котором происходит эволюция системы) и ее инвариантной меры (равновесного распределения состояний системы на аттракторе) к изменениям параметров системы [38, 80]. При изучении отклика климатической системы на малые внешние воздействия считается, что динамика климатической системы происходит на ее аттракторе, а для ее качественного анализа можно использовать модели, которые в той или иной мере успешно описывают современный климат. Важно, однако, иметь в виду, что типичные модели климатической системы обладают свойством хаотичности, обусловленной наличием положительных показателей Ляпунова, и диссипативны, так что их аттракторы имеют фрактальную топологическую структуру.

Перспективным методом оценки чувствительности климатических моделей и реальной климатической системы к внешним воздействиям является построение приближенного оператора отклика на основе флуктуационно-диссипационных соотношений (ФДС), связывающих операторы отклика статистических характеристик модели с ее невозмущенными статистическими характеристиками [81]. Это означает, что оператор отклика системы может быть вычислен исключительно по данным невозмущенной траектории системы и, следовательно, чувствительность определенных характеристик реальной климатической системы к изменению внешних параметров может быть также вычислена непосредственно по данным наблюдений. ФДС-технология построения оператора отклика требует вычисления многомерных ковариационных матриц системы и их последующее обращение, что является сложной вычислительной задачей. В статье Грицуна и Бранстатора [82] продемонстрировано, как эта технология может быть использована для построения линейной части оператора отклика на основе данных, полученных с помощью (нелинейной) модели общей циркуляции атмосферы. С этой целью была использована модель ССМО Национального центра атмосферных исследований (NCAR, Боулдер, США), которая была проинтегрирована в режиме "непрерывного января" на 4 миллиона дней. Картины стационарного отклика в поле температуры и функции тока на возмущения в источниках тепла, рассчитанные с помощью ФДС-технологии и прямым (с помощью модели ССМ0) образом, показали достаточно хорошее соответствие друг с другом. Оказалось также возможным сформулировать и решить обратную задачу - найти возмущение, которое будет оптимальным для заданного отклика. В работе Грицуна с соавторами [83] ФДС-метод построения оператора отклика обобщен на случай климатических характеристик, не являющихся параметрами состояния системы, а представляющих собой некоторые их функционалы, такие, например, как осредненные осадки, средняя дивергенция в верхней тропосфере или низкочастотная изменчивость функции тока. В частности, построены оптимальные тропические воздействия, вызывающие максимальные изменения в изменчивости синоптических вихрей в средних широтах. Следует, однако, заметить, что основным ограничением ФДС-метода является требование статистической равновесности невозмущенной системы, что невозможно, если правая часть системы содержит явную зависимость от времени. Недавно полученные обобщенные флуктуационно-диссипационные соотношения [84] дают теоретическую возможность построения оператора отклика и в этом случае.

По-видимому, в настоящее время единственным методом исследования аттракторов многомерных климатических систем является численная аппроксимация соответствующих множеств [85], например, вычисление глобальных ляпуновских показателей (как индикаторов меры неустойчивости траектории системы на аттракторе) и размерности аттрактора системы (как меры сложности ее динамики). Перспективным представляется способ описания фрактального аттрактора системы на основе его аппроксимации с помощью простых базовых множеств, например, периодических орбит. Решение проблем, относящихся к существованию периодических решений в фазовом пространстве атмосферных моделей и установлению связей между характерными режимами циркуляции и свойствами модельного фазового пространства, а также выяснение возможности аппроксимации циркуляции с помощью периодических движений дано в цикле работ Грицуна [86–89].

В первой из работ этого цикла [86] для баротропной модели атмосферы сформулированы и реализованы несколько методов поиска периодических орбит модели, с помощью которых удалось найти более 1500 периодических решений модели. Рассчитанные орбиты имеют широкий диапазон периодов (от 4 до 200 дней) и различные характеристики устойчивости (от 2 до 30 неустойчивых мод). В следующей статье [87] рассматривается проблема аппроксимации инвариантной меры и статистических характеристик модели баротропной атмосферы с помощью ее периодических траекторий. Возможность такой аппроксимации базируется на идеях теории динамических систем, утверждающей, что в некоторых частных случаях (например, для гиперболических систем) периодические траектории определяют меру системы. При этом орбиты учитываются согласно весу, определяемому характеристиками их неустойчивости. В статье показано, что при подходящем способе осреднения удается воспроизвести плотность вероятности распределения точек в фазовом пространстве системы с погрешностью, не превышающей 10%. В заключительных статьях [88, 89] упомянутого выше цикла метод обобщенных ФДС был использован для построения приближенного оператора отклика модели САМЗ NCAR. С этой целью предложен численный метод построения оператора оклика и проведены предварительные расчеты отклика модели на экваториальные термические воздействия.

В 2007–2010 гг. проводились исследования по усовершенствованию и развитию методов решения задач экологии в условиях изменения климата и качества природной среды [90–92]. 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. 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, сопряженных и обратных задач для математических моделей гидродинамики, переноса и трансформации примесей и расчета соотношений чувствительности функционалов качества атмосферы. В статьях Пененко и Цветовой [90, 91] предложена методика экологического прогнозирования с учетом изменений климатических факторов. Из многомерных многокомпонентных баз данных, содержащих информацию о функциях состояния, описывающих атмосферные процессы за длительный срок, с помощью ортогональной декомпозиции выделена совокупность подпространств, ранжированных по масштабам возмущений. Лидирующая часть подпространств, учитывающих процессы климатического масштаба, составляет информативный базис для формирования гидродинамического фона при расчете прогностических сценариев изменения качества атмосферы. Для отработки методики использована база данных реанализа NCEP/NCAR более чем за 50 лет. В цитированной статье приведены результаты сценарных расчетов по оценке риска загрязнения атмосферы в регионе Дальнего Востока России и сопредельных территорий Китая и Кореи. В работе Пененко [92] излагается концепция природоохранного прогнозирования, базирующаяся на вариационных принципах в сочетании с методами усвоения данных наблюдений и основанная на оценке риска и уязвимости территорий по отношению к антропогенным воздействиям, что позволяет оценить влияние неопределенностей на качество прогноза.

В заключение авторы благодарят всех специалистов, внесших свой вклад в развитие динамической метеорологии в России и результаты исследований которых были использованы при подготовке данного обзора, а также Российский фонд фундаментальных исследований и Министерство образования и науки России за финансовую поддержку (грант № 11-05-00435 и Госконтракт 07.514.11.4044 соответственно).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Романова Н.Н., Якушкин И.Г. О гамильтоновом описании сдвиговых и гравитационно-сдвиговых волн в идеальной несжимаемой жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 5. С. 579–590.
- 2. Романова Н.Н. О резонансном взаимодействии волн непрерывного и дискретного спектра в простейшей модели стратифицированного сдвигового течения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 48–55.

- 3. *Курганский М.В.* Вертикальный поток спиральности в атмосферных вихрях как мера их интенсивности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 67–74.
- 4. *Glazunov A.V., Dymnikov V.P., Lykossov V.N.* Mathematical modelling of spatial spectra of atmospheric turbulence // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 25. № 5. P. 431–451.
- Tung K.K., Orlando W.W. On the differences between 2D and QG turbulence // Discrete and continuous dynamical systems. 2003. V. 3. P. 145–162.
- 6. *Nastrom G.D., Gage K.S.* A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft // J. Atmos. Sci. 1985. V. 42. № 9. P. 950–960.
- Гурвич А.С., Кухарец В.П. Горизонтальные и наклонные спектры флуктуаций температуры в устойчиво стратифицированной тропосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 773–778.
- 8. *Гурвич А.С., Чунчузов И.П.* Модель трехмерного спектра анизотропных неоднородностей температуры в устойчиво-стратифицированной атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 611–628.
- 9. Пономарев В.М., Хапаев А.А., Якушкин И.Г. Вертикальная структура квазидвумерного поля скорости течения вязкой несжимаемой жидкости и проблема нелинейного трения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 56–66.
- Пономарев В.М., Хапаев А.А., Якушкин И.Г. Нелинейное экмановское трение и асимметрия циклонических и антициклонических когерентных структур в геофизических течениях // ДАН. Геофизика. 2009. Т. 425. № 6. С. 821–826.
- Цескис А.Л. О свойствах вырождающейся двумерной турбулентности: особенности спектров и когерентные структуры // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 695–709.
- Гледзер Е.Б. Параметры подобия и центробежная конвективная неустойчивость горизонтально неоднородных циркуляций типа Хэдли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 36–47.
- Калашник М.В. Линейная динамика волн Иди в присутствии горизонтального сдвига // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 764–773.
- 14. *Eady E.T.* Long waves and cyclone waves // Tellus. 1949. V. 1. № 3. P. 35–52.
- Дружинин О.А. О развитии неустойчивости трехмерной струи в стратифицированной жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 828–841.
- Калашник М.В. Захваченные симметричные возмущения во вращающихся сдвиговых течениях // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 848-855.

- 17. *Калашник М.В., Вишератин К.Н.* Циклострофическое приспособление и нелинейные колебания в ядре интенсивного атмосферного вихря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 638–644.
- Кляцкин В.И. Статистика и реальность в стохастических динамических системах // Нелинейные волны 2004. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 256–286.
- 19. *Кляцкин В.И*. Динамические стохастические системы, кривая типичной реализации и ляпуновские экспоненты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 21–35.
- Isichenko M.B. Percolation, statistical topography, and transport in random media // Rev. Modern Phys. 1992. V. 64. № 4. P. 961–1043.
- Tanaka H.L., Matsueda M. Analysis of recent extreme events measured by the barotropic component of the atmosphere // J. Meteor. Soc. Japan. 2004. V. 82. № 5. P. 1281–1299.
- Курбаткин Г.П. Об оценке полувековой эволюции механизмов, контролирующих в годовом цикле теплообмен между высокими и средними широтами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 4. С. 419–434.
- 23. Курбаткин Г.П., Смирнов В.Д. Межгодовые вариации температуры тропосферы, связанные с декадными изменениями Североатлантического колебания // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 435–447.
- 24. Боровко И., Крупчатников В. Влияние динамики стратосферного полярного вихря на циркуляцию в тропосфере // Сиб. журн. вычисл. математики. 2009. Т. 12. № 2. С.145–160.
- 25. *Borovko I., Krupchatnikov V.* The influence of the stratosphere polar vortex dynamics upon a low troposphere thermal stratification // Bull. Nov. Comp. Center. Num. Model in Atmosph. 2010. № 12. P. 1–7.
- 26. *Dunkerton T. J., Baldwin M. P.* Quasi-biennial modulation of planetary-wave fluxes in the Northern Hemisphere winter // J. Atmos. Sci. 1991. V. 48. № 8. P. 1043–1061.
- Baldwin, M. P., Dunkerton T. J. Quasi-biennial modulations of the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex // Geophysics. Res. Lett. 1998. V. 25. № 17. P. 3343–3346.
- 28. *Knaff J. A.* Evidence of a stratospheric QBO modulation of tropical convection // Dep. of Atmos. Sci., Colo. State Univ., Fort Collins, 1993. Pap. № 520, 91 p.
- Giorgetta M.A., Manzini E., Roeckner E. et al. Climatology and forcing of the quasi-biennial oscillation in the MAECHAM5 model // J. Climate. 2006. V. 19. № 16. P. 3882–3901.
- 30. Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть І. Малопараметрические модели // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 5–20.

300

- 31. Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть II. Модели общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 43-61.
- 32. Кулямин Д.В., Дымников В.П. Спектральные характеристики квазидвухлетних колебаний экваториального стратосферного ветра и проблема синхронизации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 467–486.
- 33. *Dymnikov V.P., Kulyamin D.V.* Structural stability of quasi-biennal oscillations of zonal wind in the equatorial stratosphere // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 25. № 3. P. 235–251.
- Plumb R.A. The interaction of two internal waves with the mean flow: implications for the theory of the quasibiennial oscillation // J. Atmos. Sci. 1977. V. 34. № 12. P. 1847–1858.
- 35. *Hines C.O.* Doppler spread parameterization of gravity wave momentum deposition in the middle atmosphere. Pt 1. Basic formulation // J. Atm. Terr. Phys. 1997. V. 59. № 4. P. 371–386.
- 36. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Логинов С.В. и др. Исследование циклонической и антициклонической активности на территории Западной Сибири по данным реанализа NCEP/DOE AMIP-II и синоптических карт // Оптика атмосферы океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 38–41.
- Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976–2004 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28–36.
- Дымников В.П., Филатов А.Н. Устойчивость крупномасштабных атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 236 с.
- 39. Лупо А.Р., Мохов И.И., Достоглоу С. и др. Оценка влияния на распад блокингов процессов планетарного масштаба с анализом фазовых траекторий и энстрофии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 52–60.
- 40. Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б. и др. Воспроизведение сезонной атмосферной циркуляции модифицированной полулагранжевой моделью атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 2. С. 149–160.
- 41. Климова Е.Г., Киланова Н.В., Дубровская О.А. и др. Исследование статистической структуры ошибок краткосрочного прогноза температуры в атмосферном погранслое для целей объективного анализа // Метеорология и гидрология. 2010. № 9. С. 26–34.
- Климова Е.Г. Метод усвоения данных наблюдений, основанный на применении π-алгоритма // Метеорология и гидрология. 2008. № 3. С. 16–26.
- Климова Е.Г. Метод усвоения данных наблюдений, основанный на ансамблевом π-алгоритме // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 45–53.

- 44. Пененко В.В. Вариационные методы усвоения данных и обратные задачи для изучения атмосферы, океана и окружающей среды // Сиб. журн. вычислит. математики. 2009. Т. 12. № 4. С. 421–434.
- 45. *Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е. и др.* Интенсивные арктические мезоциклоны // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 291–297.
- 46. *Голицын Г.С.* Ураганы, полярные и тропические, их энергия и размеры, количественный критерий возникновения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 579–590.
- 47. *Golitsyn G.S.* Tropical cyclones and polar lows: velocity, size and energy scales, and relation to the 26°C cyclone origin criteria // Adv. Atmos. Sci. 2009. V. 26. № 3. P. 585–598.
- 48. *Ishioka K., Yoden S.* Non-linear aspects of a barotropically unstable polar vortex in a forced dissipative system: Flow regimes and tracer transport // J. Meteor. Soc. Japan. 1995. V. 73. № 2. P. 201–212.
- 49. Шагалов С.В., Реутов В.П., Рыбушкина Г.В. Асимптотический анализ перехода к турбулентности и хаотической адвекции в сдвиговых зональных течениях на бета-плоскости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 1. С. 105–118.
- 50. Zilitinkevich S., Gryanik V.M., Lykossov V.N. u ∂p. Third-order transport and non-local turbulence closures for convective boundary layers // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. № 19. P. 3463–3477.
- 51. *Кухарец В.П., Налбандян О.Г., Шмаков А.В.* Перенос пассивной примеси в турбулентной среде с конвективным перемешиванием // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 443–447.
- 52. Горбатенко В.П., Константинова Д.А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 17–21.
- 53. Константинова Д.А., Горбатенко В.П. Условия образования шквала над юго-восточной территорией Западной Сибири // Вестн. Томского гос. ун-та. 2010. № 337. С. 189–193.
- 54. Ананова Л.Г., Горбатенко В.П., Луковская И.А. Особенности радиолакационных характеристик конвективной облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 51–56.
- 55. Алоян А.Е. Моделирование динамики аэрозолей при лесных пожарах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 62–75.
- 56. Кадыгров Н.Е., Крученицкий Г.М., Лыков А.Д. Количественные оценки возмущений, вносимых мегаполисом в поле температуры атмосферного пограничного слоя // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 28–41.
- 57. Шлычков В.А., Селегей Т.С., Мальбахов В.М. и др. Диагноз экстремальных концентраций формальдегида в г. Томске на основе численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С.493–498.

- 58. Пененко В.В., Пьянова Э.А., Чернова А.В. Изучение процессов мезомасштабного переноса примесей с помощью моделей эйлерова и лагранжевого типов // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 484–490.
- 59. Балин Ю.С., Ершов А.Д., Пеннер И.Э. и др. Экспериментальные и модельные исследования пространственного распределения атмосферного аэрозоля над акваторией оз. Байкал // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 114–121.
- 60. Потемкин В.Л., Макухин В.Л. Загрязнение ландшафтов в котловине озера Байкал при лесных пожарах // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 60-63.
- 61. Потемкин В.Л., Макухин В.Л. Распределение малых газовых примесей в атмосфере над озером Байкал // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 80-84.
- 62. *Курбацкий А.Ф*. Противоградиентный перенос тепла в атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 171–177.
- 63. Панин Г.Н., Бернхофер Х. Параметризация турбулентных потоков над неоднородными ландшафтами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 755–772.
- 64. Глазунов А.В. Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического локализованного замыкания. Часть 1. Формулировка задачи, описание модели и диагностические численные тесты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 7–28.
- 65. Глазунов А.В. Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического локализованного замыкания. Часть 2. Численные эксперименты; моделирование турбулентности в канале с шероховатыми границами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 29–42.
- 66. Johnston J. P., Halleen R.M., Lezius D.K. Effects of spanwise rotation on the structure of two-dimensional fully developed turbulent channel flow // J. Fluid Mech. 1972. V. 56. P. 533–557.
- *Zhikanov O., Slinn, D. N., Dhanak M.* Large-eddy simulations of the wind-induced turbulent Ekman layer // J. Fluid Mech. 2003. V. 495. P. 343–368.
- 68. Глазунов А.В. О влиянии направления геострофического ветра на турбулентность и квазиупорядоченные крупномасштабные структуры в пограничном слое атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 6. С. 786–807.
- 69. Герценштейн С.Я., Палымский И.А., Сибгатуллин И.Н. Об интенсивной турбулентной конвекции в горизонтальном плоском слое жидкости // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 75–85.
- Powell M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature. 2003. V. 422. P. 279–283.

- 71. *Kudryavtsev V., Makin V.* Aerodynamic roughness of the sea surface at high winds // Boundary-Layer Meteorol. 2007. V. 125. № 2. P. 289–303.
- Lykossov V.N. Atmospheric and oceanic boundary layer physics // Wind Stress over the Ocean / Eds: Ian S.F. Jones, Yoshiaki T. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. P. 54–81.
- 73. *Andreas E.L.* Spray stress revisited // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. № 6. P. 1429–1440.
- 74. *Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В.* Квазилинейная модель взаимодействия поверхностных волн с сильными и ураганными ветрами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5. С. 670–694.
- 75. *Barenblatt G.I., Golitsyn G.S.* Local structure of mature dust storms // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31. № 7. P. 1917–1933.
- 76. Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г. Динамика воздуха вблизи поверхности почвы и конвективный вынос аэрозоля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 1. С. 35–47.
- 77. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Особенности турбулентного переноса импульса и тепла в устойчиво стратифицированном пограничном слое над шероховатой поверхностью // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 786–796.
- 78. *Kurbatskiy A.F., Kurbatskaya L.I.* $E \varepsilon \langle \theta^2 \rangle$ turbulence closure model for an atmospheric boundary layer including the urban canopy // Meteorology and Atmospheric Physics. 2009. V. 104. Nos. 1–2. P. 63–81.
- 79. 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.
- 80. *Dymnikov V.P., Filatov A.N.* Mathematics of climate modeling. Boston: Birkhauser, 1997. 264 p.
- Дымников В.П., Грицун А.С. Современные проблемы математической теории климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 294–314.
- 82. Gritsun A.S., Branstator G. Climate response using a three-dimensional operator based on the fluctuationdissipation theorem // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. № 7. P. 2558–2575.
- 83. Gritsun A.S., Branstator G., Majda A. Climate response of linear and quadratic functionals using the fluctuation-dissipation theorem // J. Atmos. Sci. 2008. V. 65. № 9. P. 2824–2841.
- 84. *Majda A.J., Wang X.* Linear response theory for statistical ensembles in complex systems with time-periodic forcing // Comm. Math. Sci. 2010. V. 8. № 1. P. 145–172.
- 85. Дымников В.П., Грицун А.С. Парная симметрия глобальных показателей Ляпунова для моделей динамики атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 269–274.
- 86. Gritsun A.S. Unstable periodic trajectories of a barotropic model of the atmosphere // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2008. V. 23. № 4. P. 345–367.

- *Грицун А.С.* Статистические характеристики баротропной модели атмосферы и ее неустойчивые периодические решения // ДАН. Науки о Земле. 2010. Т. 435. № 6. С. 810–814.
- 88. Грицун А.С. Построение оператора отклика на малые внешние воздействия для моделей общей циркуляции атмосферы с периодическими по времени правыми частями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 6. С. 808–817.
- 89. Gritsun A.S. Unstable periodic orbits and sensitivity of the barotropic model of the atmosphere // Russ. J.

Numer. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 25. № 4. P. 303–321.

- 90. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Математические модели природоохранного прогнозирования // ПМТФ. 2007. Т. 48. № 3. С. 152–163.
- 91. *Penenko V., Tsvetova E.* Orthogonal decomposition methods for inclusion of climatic data into environmental studies // Ecol. Modeling. 2008. V. 217. № 3–4. P. 279–291.
- 92. *Пененко В.В.* О концепции природоохранного прогнозирования // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С. 432–438.

Some Directions in the Development of Dynamic Meteorology in Russia in 2007–2010

V. N. Lykossov^{a, b} and V. N. Krupchatnikov^{c, d}

^a Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 8, Moscow, 119333 Russia ^b Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^c Siberian Regional Research Institute of Hydrometeorology, ul. Sovetskaya 30, Novosibirsk, 630099 Russia ^d Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Division, Russian Academy of Sciences, pr. Akademika Lavrent'eva 6, Novosibirsk, 630090 Russia

e-mail: lykossov@inm.ras.ru; vkrup@ommfaol.sscc.ru Received June 1, 2011; in final form, August 29, 2011

Abstract—A brief review of the results of investigations carried out by Russian scientists in the field of dynamic meteorology in 2007–2010 is presented. This review is based on the information prepared by the Commission on the Dynamic Meteorology of the National Geophysical Committee, Russian Academy of Sciences, and included in the general information report of the Section of Meteorology and Atmospheric Sciences at the XXV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics.

Keywords: dynamic meteorology, atmospheric dynamics, mesoscale processes, turbulence, weather forecast, climate, ecology, mathematical modeling.