

О некоторых результатах исследований в области численного прогноза погоды и теории климата в Сибири

В. Н. Крупчанников*, **, ***, Г. А. Платов**, ***,

Е. Н. Голубева**, ***, А. А. Фоменко*, **,

Ю. Ю. Клевцова*, **** В. Н. Лыкосов*****

Представлены результаты исследований в области численного прогноза погоды и теории климата, полученные коллективом ученых, относящих себя к Сибирской школе математического моделирования динамики атмосферы и океана, которая была создана академиком Гурием Ивановичем Марчуком. Огромную роль в ее развитии сыграл академик Валентин Павлович Дымников, обогатив ее новыми подходами и идеями. Рассмотрены три проблемы, в исследовании которых влияние В. П. Дымникова на Сибирскую школу математического моделирования проявилось наиболее ярко: численный прогноз погоды для Сибирского региона, моделирование динамики климатической системы, математика и теория климата.

Ключевые слова: физика климатической системы, численное моделирование динамики погоды и климата, математика и климат.

1. Введение

Физико-математические модели являются основным инструментом для исследования общей циркуляции атмосферы и океана, изучения климатических изменений и прогноза погоды различных масштабов и заблаговременности. Направления исследований, проводимых Сибирской школой математического моделирования динамики атмосферы и океана, были заложены академиком Г. И. Марчуком. Рассматриваются следующие задачи: создание, совершенствование и анализ математических моделей динамики атмосферы и океана на основе современных методов прикладной математики и теории дифференциальных уравнений; разработка и развитие схем параметризации физических процессов (стохастическая физика, турбулентная диффузия, взаимодействие с подстилающей поверхностью, процессы конденсации и конвекции, облакообразование и осадки, радиация); созда-

* Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт; e-mail: vkrupchatnikov@yandex.ru.

** Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук.

*** Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

**** Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики.

***** Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской академии наук.

***** Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

ние систем усвоения данных на различных масштабах; ансамблевый прогноз и предсказуемость.

Значительный вклад в развитие каждого из этих направлений внес академик В. П. Дымников. Его первые работы были посвящены разработке эффективных численных методов и физических параметризаций для создания моделей прогноза погоды, которые были внедрены в оперативную практику Гидрометслужбы Западной Сибири, обеспечивая высокое качество краткосрочного прогноза погоды. Эти работы послужили основой для разработки и внедрения следующего поколения прогностической системы с более высоким разрешением и более детальным описанием физических процессов в атмосфере.

В течение многих лет В. П. Дымников поддерживал научные исследования, проводимые в лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере Института вычислительной математики и математической геофизики (ИВМиМГ) Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН). В начале 2000-х годов он обратил внимание сотрудников лаборатории на ряд интересных научных проблем, возникающих в связи с возрастающей ролью процессов полярных широт в климатической системе Земли. В частности, для рассмотрения были рекомендованы задачи моделирования климатической изменчивости состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана и изучения распространения пресных вод сибирских рек в системе глобальной океанической циркуляции. Эти вопросы в течение последних десятилетий находятся в центре внимания международных исследовательских коллективов. Численная модель океана и морского льда, разработанная в ИВМиМГ, активно используется в международном проекте FAMOS/AOMIP (“Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis”, <http://web.whoi.edu/famos/>), целью которого является разработка координированного подхода к исследованию климатических процессов в Арктике на основе объединения численного моделирования, теоретических исследований и анализа данных наблюдений.

Накопленный в Сибирской школе опыт позволяет проводить исследования, связанные с разработкой и усовершенствованием физико-математических моделей для изучения физических механизмов многомасштабных процессов формирования погоды и климата Земли.

2. Численный прогноз погоды для Сибирского региона

Гидродинамические модели краткосрочного прогноза погоды стали внедряться в оперативную практику Западно-Сибирского управления Гидрометслужбы с 1962 г. После того как использование упрощенных уравнений гидротермодинамики атмосферы исчерпало себя, стало ясно, что дальнейший прогресс в области численных прогнозов погоды связан с развитием методов решения полных уравнений гидротермодинамики, описывающих атмосферные процессы. В 1971 г. в Западно-Сибирском управлении Гидрометслужбы появилась новая гидродинамическая модель прогноза погоды [10, 12, 14, 15, 39], созданная в Вычислительном центре СО АН СССР и внедренная в Западно-Сибирском региональном научно-исследовательском гидрометеорологическом институте коллективом сотрудни-

ков во главе с заведующим отделом В. П. Дымниковым. Эта модель, получившая название “ДИАБАТ”, стала основой оперативного комплекса расчета численного прогноза метеорологических величин, который до 1992 г. успешно использовался в Западно-Сибирском региональном гидрометцентре [14, 15], не уступая по точности прогноза лучшим мировым схемам. В соответствии с новыми требованиями, предъявляемыми к прогностическим системам прогноза погоды, среди которых особое значение имели повышение качества прогноза метеорологических величин и расширение спектра прогнозируемых параметров, эта технология прогноза получила дальнейшее развитие [24] благодаря росту вычислительных возможностей. По инициативе В. П. Дымникова к этому времени была разработана новая региональная модель динамики атмосферы [17, 24, 26, 50], обеспечивающая детальное описание физических процессов в модели высокого разрешения для заданного региона при ее взаимодействии с глобальными моделями.

Следует отметить, что исходная система дифференциальных уравнений гидротермодинамики атмосферы, записанная в σ -системе координат, обладает рядом интегральных инвариантов: сохранение полной энергии (в отсутствие диссипации и притоков тепла), углового момента (абсолютного момента количества движения) при зональном переносе, потенциальной энтропии (в приближении уравнений мелкой воды). Поскольку региональная модель динамики атмосферы используется также и для климатических исследований, где выполнение интегральных законов сохранения необходимо, численная модель динамики атмосферы строится, исходя из требования выполнения конечно-разностных аналогов вышеперечисленных интегральных характеристик [28].

Подробное описание этой модели, которая стала основой технологии численного прогноза погоды заблаговременностью 2—3 суток в Западно-Сибирском УГМС Росгидромета, приведено в работах [27, 29]. Схема прогноза была реализована с пространственным разрешением 1,25° × 1,66° вдоль долготы и широты соответственно и с 15° -уровнями по вертикали (10 — в тропосфере и 5 — в стрatosфере). Интегрирование проводится по области 40—80° с. ш., 40—145° в. д., покрывающей территорию Урала, Западной и Восточной Сибири. На верхней границе применяется краевое условие свободной поверхности, а на нижней — условие обтекания. Шаг интегрирования по времени составляет 5 мин при прогнозе на 48 ч. В качестве начальных и граничных условий (подкачиваемых с интервалами в 6 ч) использовались результаты прогнозов по глобальной модели центра Экзетер (Брэкнел, Великобритания), поступающие в Западно-Сибирский региональный вычислительный центр в кодировке GRIB на сетке 2,5° × 2,5° за сроки 0 и 12 ч ВСВ. Разработаны схема многоэлементного трехмерного численного анализа метеорологических данных для Сибирского региона [22] и метод нелинейной инициализации по нормальным модам для региональной модели атмосферы, позволяющий эффективно подавлять амплитуду гравитационных волн на начальном этапе интегрирования [4, 5, 17, 18, 27]. При расчете численного прогноза погоды используется также автоматизированная система сопровождения, позволяющая выполнять контроль полноты и качества информации, поступающей из глобальной моде-

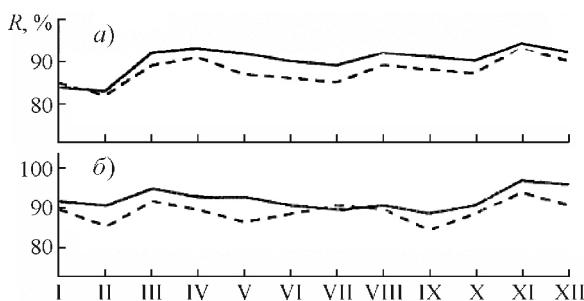


Рис. 1. Коэффициент корреляции прогностических и фактических значений тенденций приземного давления (*а*) и геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа (*б*) для прогнозов на 24 ч (сплошная линия) и 48 ч (штриховая линия) в 1992 г.

ли прогноза, осуществлять архивацию и проводить оценки (по зоне ответственности Западно-Сибирского УГМС) результатов прогнозов — как формальные (статистические), так и сравнительные (по фактическим данным). В качестве примера на рис. 1 приведены коэффициенты корреляции тенденций приземного давления и геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа на момент внедрения технологии прогноза в оперативную практику.

Детальное описание оперативной технологии численного прогноза погоды, действовавшей в Западно-Сибирском управлении Гидрометслужбы вплоть до 2010 г., представлено в работах [4, 5, 18]. На основе данных численного прогноза было показано также, что эта модель может быть использована для диагноза мезомасштабных явлений, например, таких как фронты [1, 2].

3. Моделирование динамики климатической системы

Накопленный за последние десятилетия опыт математического моделирования, основанный на достижениях геофизической гидродинамики и вычислительной математики, позволяет создавать мощные системы усвоения метеорологических и океанографических данных с высоким пространственно-временным разрешением, разрабатывать высококачественные оперативные технологии численного прогноза погоды, проводить исследования по математическому моделированию климата. Подобного рода исследования связаны с решением таких проблем, как создание математического аппарата для численного решения системы нелинейных трехмерных уравнений геофизической гидротермодинамики, изучение физических механизмов многомасштабных процессов формирования погоды и климата и формулировка математических моделей динамики атмосферы и океана. Все эти исследования и разработка комплекса программ проводились и проводятся в соответствии с планами научно-исследовательских работ Сибирского научно-исследовательского гидрометеорологического института Росгидромета (СибНИГМИ) и Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Был разработан программный ком-

плекс на основе сопряжения глобальной модели динамики атмосферы [28, 30, 31, 40, 45] и региональной климатической модели для изучения чувствительности динамики атмосферы к аномалиям температуры поверхности океана [30, 31], исследования реакции атмосферы на увлажненность континентов [40] и проведения численных экспериментов по моделированию климата Сибири.

При описании взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности в глобальной модели климата особое внимание было удалено биофизическим и биохимическим процессам [23, 32, 46, 49]. Успешное воспроизведение явного и скрытого потоков тепла на поверхности невозможно без детального описания состояния биосфера и без учета биохимических факторов в дополнение к традиционным механизмам, которые применяются для описания этих потоков. В то же время моделирование первичного продукта и эмиссии парниковых газов требует презентативного описания гидрологии поверхности, динамики приземного слоя и термического режима почвы. Все эти модели (биосферные, гидрологические и атмосферные) описывают в климатической системе процессы разных временных масштабов. Биосфера поверхности является важнейшей составной частью климатической системы Земли с точки зрения изменений климата, гидрологического цикла и глобального цикла основных парниковых газов [24, 25]. Особое внимание исследователей привлекают обратные связи между процессами в почве и в атмосфере. В средних и высоких широтах термодинамическое влияние почвы сравнимо с влиянием океана. В то время как океан аккумулирует солнечную энергию летом и отдает накопленное тепло атмосфере зимой, почва накапливает осадки зимой, с тем чтобы снабжать атмосферу влагой летом и охлаждать ее. Таким образом, возникает эффект долговременной памяти с масштабом в несколько месяцев. Особый интерес представляет процесс, в результате которого увеличение эвапотранспирации прямым или косвенным образом усиливает осадки (на масштабах нескольких сотен километров) [36].

Общепризнано, что потепление климата вследствие повышения концентрации парниковых газов в атмосфере наиболее ярко выражено в полярных областях Северного полушария. Ожидается, в частности, что в условиях все возрастающей концентрации парниковых газов наиболее значимые изменения произойдут в полях температуры и осадков с последующими воздействиями на состояние морского льда и вечной мерзлоты, которая покрывает большую часть территории России. Пороговое значение температуры 0 С, связанное с фазовыми переходами между водой и льдом, является критическим для северных регионов, поскольку в условиях существенного потепления климата следует ожидать резкого ускорения уже наблюдающегося процесса деградации вечной мерзлоты. Это, в свою очередь, может послужить спусковым механизмом для эрозии и оседания почв в этих районах с неблагоприятными последствиями как для экологической системы, так и для хозяйственной деятельности человека. Это потепление может привести к увеличению глубины сезонного протаивания, прямо воздействуя на химические и биологические процессы в арктической тундре. Большая часть территории России находится в зоне вечной мерзлоты, оттаивание которой при нарастающем воздействии антропоген-

ных факторов может вызвать серьезные последствия: расконсервация менее 0,1% количества органического углерода, хранящегося в верхнем 100-метровом слое мерзлоты (примерно 10^4 Гт углерода в форме CH_4) может привести к удвоению содержания в атмосфере метана, радиационная активность которого примерно в 20 раз выше, чем CO_2 . Это может привести к еще большему потеплению, а значит, и к ускорению таяния мерзлоты (реализуется механизм положительной обратной связи, способный многократно усилить глобальное потепление).

Рассмотренные выше процессы учтены в модели климатической системы, разработанной коллективом сотрудников ИВМиМГ СО РАН [23, 46, 49] и получившей развитие в направлении учета биофизических и биохимических процессов в слое растительности и в почве [24, 25]. Она описывает простые биохимические процессы (например, потоки CO_2 в результате реакции фотосинтеза или вследствие процессов дыхания растений внутри некоторого биома) и эмиссию метана от естественных переувлажненных участков поверхности [25, 36]. В каждой ячейке сетки задается распределение пяти типов поверхности: ледники, озера, болота, поверхность без растительности, растительность. Данные о распределении биомов на поверхности [54], типах почвы [57] и распределении озер и заболоченных участков на континентах считаются известными.

В течение нескольких последних десятилетий наблюдается изменение общей циркуляции атмосферы, связанное с изменением климата: смещение к полюсу таких ее элементов, как ячейка Гадлея и шторм-треки, изменение высоты тропопаузы и др. Эти процессы стали предметом совместного исследования, выполненного сотрудниками ИВМиМГ СО РАН и СибНИГМИ. Проводилось исследование особенностей динамики ячейки Гадлея и высоты тропопаузы в условиях изменяющегося климата, обнаруженных в ходе численных экспериментов [3, 38, 41, 53]. На основе результатов численных расчетов динамики климата с использованием идеализированной модели было показано, что тенденция к смещению к полюсам шторм-треков в Северном полушарии в условиях потепления климата (по сценарию RCP-8.5) будет сохраняться.

При поиске возможных физических механизмов, которые лежат в основе динамического взаимодействия атмосферы северных и средних широт в условиях потепления в Арктике, особое внимание было обращено на динамику полярных циклонов. Для этих целей была создана оригинальная вычислительная технология, включающая глобальную модель климатической системы, региональную модель динамики атмосферы Арктики и модель Северного Ледовитого океана. Были также разработаны сценарии численного моделирования для решения поставленных задач [56].

В ИВМиМГ был разработан комплекс трехмерных численных моделей, предназначенный для исследования климата и его изменений в Северном Ледовитом океане, с детальным описанием гидрологических процессов, протекающих в районах шельфовых морей [6, 33, 34, 47, 55]. Этот комплекс включает глобальную океаническую модель и региональные модели динамики океана и морского льда разной степени пространственной детализации (от 50 до 5 км) с возможностью уточнения процессов в шельфовой зоне и областях поступления речных вод (сеточное разрешение до 400 м).

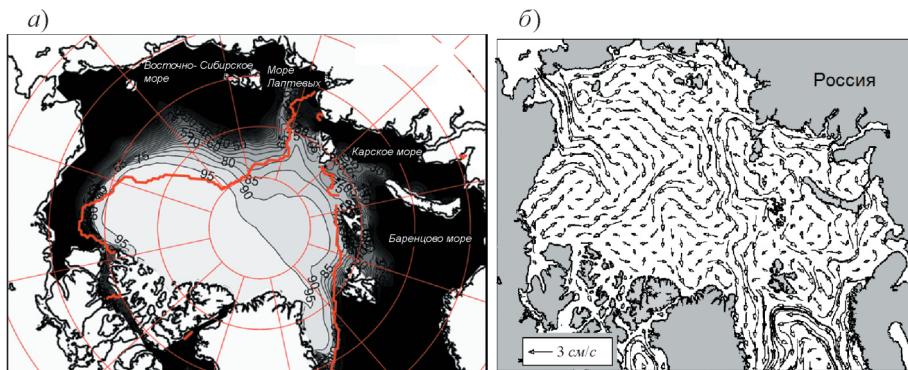


Рис. 2. Результаты численного моделирования современного состояния Северного Ледовитого океана: концентрация льда по результатам численного моделирования (%) в сентябре 2007 г. и по данным наблюдений Национального центра данных льда и снега NSCIC (а; красная линия соответствует 15%-ной концентрации), а также поле модельных течений Северного Ледовитого океана в верхнем 150-метровом слое (б).

Океанический блок модели дополнен моделью осадочного слоя с многолетней мерзлотой [37].

На основе разработанного комплекса численных моделей с привлечением атмосферных данных современного реанализа NCEP/NCAR [48] проведены численные эксперименты, моделирующие прошлое и современное состояние морского льда, термохалинных характеристик и поля течений Северного Ледовитого океана (рис. 2). Рассмотрено влияние вариаций атмосферной циркуляции на дрейф льда и циркуляцию верхнего слоя океана, термохалинную структуру вод, термодинамику ледового покрова. Исследовалось влияние тихоокеанских и атлантических вод на распределение и толщину арктического льда [6, 7], изучалась роль речного стока в формировании термохалинной структуры шельфовых вод и вод Северного Ледовитого океана. Система модельных трассеров-поплавков, выпускаемых из устьев сибирских рек, позволяет проследить пространственно-временную изменчивость траектории распространения речных вод в течение определенного периода (рис. 3) и выявить особенности их распространения. Анализ траекторий поплавков показывает, что трассеры, выпущенные из проток р. Лена, в течение нескольких лет находятся на шельфе моря Лаптевых, постепенно смещааясь

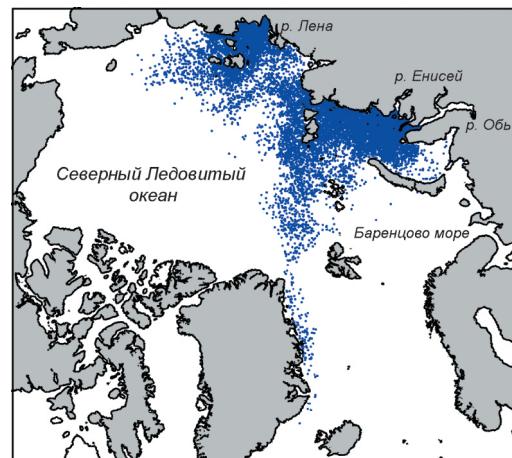


Рис. 3. Распространение трассеров-поплавков от устьев сибирских рек в течение 5 лет.

на восток в Восточно-Сибирское море и к материковому склону. Трассеры, относящиеся к рекам Енисей и Обь, заполняют шельф Карского моря и выносятся через пролив Фрама.

На основе численных экспериментов получена картина распространения аномалий солености, обусловленной стоком пресных вод сибирских рек [33—35]. Межгодовая изменчивость стока северных рек оказывает существенное влияние на характер распределения и распространения пресной воды в Северном Ледовитом океане и в Северной Атлантике, накапливая за определенные периоды аномалии, связанные с избытком или дефицитом речных вод. Формирующиеся аномалии способствуют усилению или ослаблению циклоничности циркуляции подповерхностных вод в Северном Ледовитом океане, при этом в первом случае возрастает расход распределенных и холодных вод Арктики через канадские проливы с соответствующим увеличением объемов поступающих из Атлантики соленых и теплых вод. С другой стороны, даже небольшие изменения содержания пресной воды, происходящие на фоне больших аномалий солености, приводят к значительным отклонениям от климата термохалинной структуры в верхнем слое океана, регулируя за счет изменения стратификации его конвективную устойчивость.

Использование системы вложенных моделей позволяет провести уточнение наиболее интересных процессов, протекающих на шельфе арктических морей. На основе численного моделирования исследуются возможные причины повышения температуры вод придонного слоя моря Лаптевых [43]. Результаты модельных расчетов [47] показывают следующее: в летний период динамика атмосферы является определяющим фактором в формировании циркуляции водных масс шельфовой зоны; циклонический режим циркуляции с преобладанием северо-западных ветров в летний период может приводить к передаче тепла в придонный слой шельфовых морей; эпизодическое появление в модели более теплой воды в придонном слое моря на внешней части шельфа, граничащей с материковым склоном (глубина 50—150 м), вызвано контактом с теплыми и солеными атлантическими водами, располагающимися в Северном Ледовитом океане в слое 150—1000 м; возможным механизмом формирования аномалий температуры придонного слоя мелководной прибрежной части моря Лаптевых является тепловой сток рек. Учет процесса передачи тепла из придонного слоя сибирских морей в осадочный слой шельфа, характеризующегося наличием многолетнемерзлых пород, позволяет оценить современное состояние и скорость деградации многолетней субаквальной мерзлоты [37].

4. Математика и теория климата

Атмосферный перенос тепла и влаги от экватора к полюсам имеет принципиальное значение для метеорологии и климатологии Земли. Бароклиновые вихри являются основным механизмом этого меридионального переноса в средних широтах. Среднеширотный перенос тепла и влаги бароклиновыми волнами играет определяющую роль в балансе энергии Земли и имеет решающее значение для формирования источников явного и скрытого нагревания в атмосфере. В этом контексте важной проблемой в исследовании общей циркуляции атмосферы является формирование гра-

диента температуры поверхности в средних широтах: он достигает локального максимума, который в то же время меньше, чем мог бы быть в состоянии радиационно-конвективного равновесия. Однако не существует простого объяснения, почему градиент температуры принимает именно такое значение.

Теоретические основы переноса тепла в атмосфере в средних широтах в контексте бароклинических волн и их устойчивости представлены в работах [42, 43]. Однако в этих работах рассматривалась “сухая” атмосфера и влияние влажности не учитывалось. Остаются нерешенными некоторые проблемы, связанные с неустойчивостью крупномасштабных возмущений во влажной атмосфере и обусловленные включением в рассмотрение механизмов неадиабатического нагревания за счет конденсации, вызванного самими возмущениями. Экспериментальные и теоретические исследования влияния нагревания за счет конденсации на интенсивность, размеры, структуру и динамику тропических циклонов показали, что это влияние может быть значительным. Учет влияния влажности в рамках теоретического исследования динамики бароклинических волн привлек внимание исследователей, одним из первых среди которых был В. П. Дымников. Он предложил оригинальный подход к учету взаимодействия эффекта нагревания за счет конденсации и бароклинической неустойчивости [8, 9, 11]. В общем случае это очень сложная аналитическая задача с нелинейностями, обусловленными фазовыми переходами, что заставляет обратить внимание на более точное описание механизма выделения скрытого тепла, поскольку количество водяного пара в атмосфере существенно возрастает при потеплении.

Прогноз погоды и климата характеризуется неопределенностями, связанными с тем, что начальные условия никогда не могут быть известны точно, а сами модели являются несовершенными с точки зрения описания законов физики, лежащих в их основе. В связи с этим встают следующие вопросы: как можно оценить неопределенность прогнозов погоды и климата на временных масштабах от суток до столетия и что необходимо для снижения уровней неопределенности? Ответы на эти вопросы имеют решающее значение для изучения климата и требуют при проведении исследований в дополнение к физическим законам климатической системы учета теории нелинейных динамических систем и теории стохастических процессов.

Классические подходы к определению чувствительности климата основаны на концепциях, заимствованных из анализа динамических систем вблизи равновесия, однако необходима более общая точка зрения. Климат представляет собой сложную динамическую систему, характеризующуюся изменчивостью в широком диапазоне пространственных и временных масштабов, возникающей в результате неустойчивости разного рода, которая, действуя как отрицательная обратная связь, обеспечивает установление равновесных состояний. В работах [13, 16] рассматриваются фундаментальные проблемы геофизической гидродинамики и современной теории прогноза погоды и изменений климата. Основная их идея состоит в том, чтобы показать, как математика применяется при исследовании такой сложной нелинейной динамической системы, как климатическая система Земли. В работе [13] вместе с традиционными подходами к исследованию

устойчивости решений уравнений динамики атмосферы по Ляпунову предлагаются новые подходы и методы, относящиеся к изучению устойчивости аттракторов диссипативных динамических систем, к которым относится и климатическая система Земли.

Актуальной проблемой современной теории климата является высокая чувствительность климатической системы к внешним воздействиям. Следуя идеям книги В. П. Дымникова [13], в работе [20] для стохастической системы Лоренца [26, 51, 52] с правой частью, возмущенной белым шумом, было проведено исследование корректности задачи Коши. Доказана теорема о существовании и единственности решения, и дана оценка непрерывной зависимости этого решения от совокупности начальных данных и правой части на конечном отрезке времени.

В работе [13] также указывается на необходимость исследования вопроса о существовании стационарной меры для систем уравнений, описывающих динамику атмосферы, в целях изучения проблемы предсказуемости климата. Эта задача была рассмотрена в работах [19—21], где для стохастической системы Лоренца было доказано (при некоторых дополнительных ограничениях на параметры и правую часть) существование единственной стационарной меры для этой системы и дана оценка скорости сходимости распределений всех решений (из некоторого класса) указанной системы к единственной стационарной мере при $t \rightarrow +\infty$.

5. Заключение

Известно, что прогноз состояния атмосферы можно рассматривать как начально-краевую задачу математической физики, в которой будущая погода определяется интегрированием уравнений в частных производных, начиная с наблюдаемого ее состояния. С этой целью ежедневно проводится интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений с огромным ($\sim 10^9$) числом точек сетки на период от нескольких часов до нескольких месяцев с учетом динамических, термодинамических, радиационных и химических процессов. Показателем понимания происходящих процессов и возможности их численного воспроизведения является точность прогноза погоды и, кроме того, умение оценить степень предсказуемости конкретных синоптических ситуаций. Происходит отказ от парадигмы детерминизма, учитывая неопределенности (носящие случайный характер), с которыми приходится сталкиваться при формулировке начального состояния и краевых условий и при описании физических процессов. Эта тенденция была отмечена В. П. Дымниковым еще в 1970-х годах. Постепенный переход к использованию нелинейных стохастических систем дифференциальных уравнений для описания динамики погоды и климата земной системы требует математического обоснования. В это направление В. П. Дымников, его коллеги и ученики внесли огромный вклад, дав математическое обоснование новым подходам и методам решения систем уравнений динамики погоды и климата. Дальнейшие успехи в этой области требуют междисциплинарных исследований и перспективных суперкомпьютерных вычислительных технологий. По мере того как требования к точной и достоверной информации о погоде и климате становятся все более актуальными, разрешение и сложность физических процессов в гло-

бальных численных моделях должны будут увеличиваться. С другой стороны, эффективность вычислений и обработки большого объема данных налагает ограничения на сложность этих моделей, расчеты с которыми проводятся в жестких рамках оперативного технологического процесса. Эта проблема особенно остро встанет при запуске глобальных конвективно-разрешающих моделей с шагом порядка 1 км. Авторы надеются, что научные разработки Сибирской школы по математическому моделированию динамики атмосферы и океана получат развитие в рамках современных мировых тенденций в области математического моделирования динамики земной системы.

Литература

- 1. Абдурахимов Б. Ф., Крупчатников В. Н.** Численное моделирование и синоптический анализ эволюции холодного фронта. — Новосибирск, СО АН СССР ВЦ, 1992, препринт № 951, 18 с.
- 2. Абдурахимов Б. Ф., Крупчатников В. Н., Фоменко А. А.** Региональная модель для исследования эволюции высоких фронтов. — Труды Ташкентского гос. ун-та, 1991, с. 21—27.
- 3. Боровко И. В., Крупчатников В. Н.** Математическое моделирование реакции циркуляции Гадлея и стратификации внутротропической тропосферы на изменения климата с помощью спектральной модели общей циркуляции атмосферы. — Сибирский журнал вычислительной математики, 2015, т. 18, № 1, с. 27—40.
- 4. Виноградова М. В., Каминская Л. Е., Колбасова З. Д., Маев В. К., Тарасенко В. Д., Фоменко А. А.** Численный краткосрочный прогноз метеорологических величин на ограниченной территории. — Метеорология и гидрология, 1995, № 2, с. 5—15.
- 5. Виноградова М. В., Фоменко А. А.** Нелинейная инициализация по нормальным модам на ограниченной территории. — Метеорология и гидрология, 1995, № 2, с. 16—25.
- 6. Голубева Е. Н., Платов Г. А.** Численное моделирование отклика Арктической системы океан — лед на вариации атмосферной циркуляции 1948—2007 гг. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009, т. 45, № 1, с. 145—160.
- 7. Голубева Е. Н., Платов Г. А., Якшина Д. Ф.** Численное моделирование современного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана. — Лед и снег, 2015, т. 55, № 2, с. 81—92.
- 8. Дымников В. П.** Моделирование динамики влажной атмосферы. — М., ОВМ АН СССР, 1984, 75 с.
- 9. Дымников В. П.** О динамике влажной атмосферы. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1982, т. 18, № 12.
- 10. Дымников В. П.** О некоторых особенностях численного решения уравнения переноса влажности в атмосфере. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1969, т. 5, № 6, с. 649—652.
- 11. Дымников В. П.** О развитии бароклинной неустойчивости в атмосфере с переменным параметром статической устойчивости. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1978, т. 14, № 5, с. 493—500.
- 12. Дымников В. П.** Об одной постановке задачи прогноза полей влажности в атмосфере. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1971, т. 7, № 12, с. 1311—1314.
- 13. Дымников В. П.** Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. — М., ИВМ РАН, 2007, 283 с.
- 14. Дымников В. П., Ишимова А. В.** Неадиабатическая модель краткосрочного прогноза погоды. — Метеорология и гидрология, 1979, № 6, с. 5—13.
- 15. Дымников В. П., Контарев Г. Р., Гусева Н. В., Колотовкин И. В., Кулиныч А. Г., Газетова Н. П., Шеметова Г. В., Каминская Л. Е., Торбина З. В.** Прогноз метеорологических элементов на ограниченной территории. — Метеорология и гидрология, 1975, № 9, с. 6—13.
- 16. Дымников В. П., Филатов А. Н.** Устойчивость крупномасштабных атмосферных процессов. — М., ОВМ АН СССР, 1988, 140 с.
- 17. Зулунов С. М., Крупчатников В. Н., Фоменко А. А.** Методы инициализации с помощью нормальных мод для региональных моделей прогноза погоды. — Труды ЗапСибНИГМИ, 1989, вып. 89, с. 51—60.

- 18. Каминская J1. Е., Фоменко А. А.** О развитии регионального гидродинамического прогноза погоды в ЗапСибНИГМИ. — Труды СибНИГМИ, 1992, вып. 100, с. 9—17.
- 19. Клевцова Ю. Ю.** О скорости сходимости распределений решений к стационарной мере при $t \rightarrow +\infty$ для стохастической системы модели Лоренца бароклинной атмосферы. — Математический сборник, 2017, т. 208, № 7, с. 19—67.
- 20. Клевцова Ю. Ю.** О корректности задачи Коши для стохастической системы модели Лоренца бароклинной атмосферы. — Математический сборник, 2012, т. 203, № 10, с. 117—144.
- 21. Клевцова Ю. Ю.** О существовании стационарной меры для стохастической системы модели Лоренца бароклинной атмосферы. — Математический сборник, 2013, т. 204, № 9, с. 73—98.
- 22. Климова Е. Г., Ривин Г. С.** О схеме многоэлементного трехмерного численного анализа метеорологических данных для Сибирского региона. — Метеорология и гидрология, 1992, № 3, с. 16—23.
- 23. Крупчатников В. Н.** Моделирование процессов на поверхности в климатической модели ECSib для атмосферных и экологических исследований. — Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1997, препринт № 1104, 27 с.
- 24. Крупчатников В. Н., Володин Е. М., Галин В. Я., Лыкосов В. Н.** Климатология приповерхностных потоков CO₂ в совместной модели общей циркуляции атмосферы, растительности и почвы: случай с заданной архитектоникой растительности. /В сб.: Вычислительная математика и математическое моделирование (Труды международной конференции, посвященной 75-летию академика Г. И. Марчука и 20-летию Института вычислительной математики РАН, Москва, Россия, 19—22 июня 2000 г.), т. II, с. 97—112.
- 25. Крупчатников В. Н., Крылова А. И.** Моделирование атмосферного цикла метана по данным глобального мониторинга. — Оптика атмосферы и океана, 2001, т. 14, с. 515—519.
- 26. Крупчатников В. Н., Курбаткин Г. П.** Моделирование крупномасштабной динамики атмосферы. Методы диагностики общей циркуляции. — Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1991, 114 с.
- 27. Крупчатников В. Н., Маев В. К., Фоменко А. А.** Модель атмосферы на ограниченной территории с высоким разрешением. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1992, т. 28, № 1, с. 33—45.
- 28. Крупчатников В. Н., Фоменко А. А.** Математическое моделирование регионального климата Сибири. — Оптика атмосферы и океана, 1999, т. 12, № 6, с. 1—6.
- 29. Крупчатников В. Н., Фоменко А. А.** Система прогноза и четырехмерного анализа данных. Конечно-разностная модель. Т. 1. — Новосибирск, 1988, деп. в ВИНИТИ, 00.00.88, № 742-ГМ88, 94 с.
- 30. Крупчатников В. Н., Фоменко А. А.** Численное изучение реакции атмосферы к аномалии температуры поверхности Тихого океана в период начальной стадии Эль-Ниньо 1982—1983 гг. — Итоги науки и техники. Сер. Атмосфера, океан, космос — Программа “Разрезы”, 1987, т. 8, с. 54—64.
- 31. Крупчатников В. Н., Фоменко А. А.** Численное моделирование и диагноз динамических аномалий и аномалий источников нагревания в низких широтах. /В кн.: Исследование вихревой динамики и энергетики атмосферы и проблема климата. — Л., Гидрометеоиздат, 1990, с. 311—315.
- 32. Крупчатников В. Н., Янцен А. Г.** Параметризация процессов взаимодействия атмосферы и поверхности Земли в модели общей циркуляции (ECSib). — Новосибирск, ВЦ СО РАН, 1994, препринт № 1013, 15 с.
- 33. Кузин В. И., Платов Г. А., Голубева Е. Н.** Влияние межгодовой изменчивости стока сибирских рек на перераспределение потоков пресной воды в Северном Ледовитом океане и в северной Атлантике. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2010, т. 46, № 6, с. 831—845.
- 34. Кузин В. И., Платов Г. А., Голубева Е. Н., Малахова В. В.** О некоторых результатах численного моделирования процессов в Северном Ледовитом океане. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, т. 48, № 1, с. 117—136.
- 35. Кузин В. И., Платов Г. А., Лаптева Н. А.** Оценка влияния межгодовой изменчивости стока сибирских рек на циркуляцию Северного Ледовитого океана. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, т. 51, № 4, с. 437—447.
- 36. Лыкосов В. Н., Крупчатников В. Н.** Современные модели поверхности суши с детальным описанием гидрологии, процессов в биосфере и почве. /В кн.: Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование. Отв. ред. В. К. Шумный, Ю. И. Шокин, Н. А. Колчанов, А. М. Федотов. — Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2006, 648 с.
- 37. Малахова В. В., Голубева Е. Н.** Оценка устойчивости состояния мерзлоты на шельфе Восточной Арктики при экстремальном сценарии потепления в XXI в. — Лед и снег, 2016, т. 56, № 1, с. 61—72.

- 38. Мартынова Ю. В., Крупчатников В. Н.** О некоторых особенностях динамики общей циркуляции атмосферы в условиях глобального изменения климата. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, т. 51, № 3, с. 346—357.
- 39. Марчук Г. И., Контарев Г. Р., Ривин Г. С.** Краткосрочный прогноз погоды по полным уравнениям на ограниченной территории. — Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1967, т. 3, с. 1166—1178.
- 40. Фоменко А. А.** О реакции атмосферы на увлажненность континентов. /В кн.: Численные модели динамики атмосферы и океана. — Новосибирск, 1987, с. 19—28.
- 41. Borovko I. V. and Krupchatnikov V. N.** Responses of the Hadley cell and extratropical troposphere stratification to climate changes simulated with a relatively simple general circulation model. — Num. Analysis and Appl., 2015, vol. 8, No. 1, pp. 23—34.
- 42. Charney J.** The dynamics of long waves in a barocline westerly current. — J. Meteorol., 1947, vol. 4, pp. 135—162.
- 43. Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L., Kassens H., Anisimov O., Lavrov S., Razumov S., and Grigoriev M.** Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. — J. Geophys. Res., 2011, vol. 116, C10027.
- 44. Eady E.** Long waves and cyclone waves. — Tellus, 1949, vol. 1, pp. 33—52.
- 45. Fomenko A. A. and Krupchatnikoff V. N.** A finite-difference model of atmospheric dynamics with conservation laws. — Bull. Novosibirsk Comp. Center, Num. Model. Atmos., Ocean, and Environ. Studies, 1993, No. 1, pp. 17—31.
- 46. Fomenko A. A., Krupchatnikoff V. N., and Yantzen A. G.** A finite-difference model of atmosphere (ECSib) for climatic investigations. — Bull. Novosibirsk Comp. Center, Num. Model. Atmos., Ocean, and Environ. Studies, 1996, No. 4, pp. 11—19.
- 47. Golubeva E., Platov G., Malakhova V., Kraineva M., and Iakshina D.** Modelling the long-term and inter-annual variability in the Laptev Sea hydrography and subsea permafrost state. — Polarforschung, 2018; doi: 10.2312/polarforschung.87.2.195.
- 48. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woolen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetma A., Reynolds R., Jenne R., and Joseph D.** The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1996, vol. 77, pp. 437—471.
- 49. Krupchatnikoff V.** Simulation of CO₂ exchange in the atmosphere–surface biomes system by climate model ECSib. — Russ. J. Num. Anal. and Math. Model., 1998, vol. 13, No. 6, pp. 479—492.
- 50. Krupchatnikoff V. N. and Fomenko A. A.** Numerical short-range weather prediction model. — Rept. WMO / ICSU World Clim. Res. Prog., 1989, No. 13, pp. 5.10—5.12.
- 51. Krupchatnikov V. N.** Global attractors for the Lorentz model on the sphere. — Bull. Novosibirsk Comp. Center, Num. Model. Atmos., Ocean, and Environ. Studies, 1995, No. 2, pp. 31—40.
- 52. Lorenz E. N.** Energy and numerical weather prediction. — Tellus, 1960, vol. 12, No. 4, pp. 364—373.
- 53. Martynova Yu. and Krupchatnikov V.** Influence of atmospheric CO₂ variation on storm track behavior. — Geophys. Res. Abstracts, 2015, vol. 17, EGU2015-1991, EGU General Assembly. Vienna, Austria, 12—17 April 2015.
- 54. Olson J. S., Watts J. A., and Allison L. J.** Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystem. — Oak Ridge, Oak Ridge National Laboratory, 1983, Report ORNL No. 5862.
- 55. Platov G. and Klimova E.** The results of numerical simulation of the Lena River runoff with the assimilation of satellite data: Summer 2008. — Bull. Novosibirsk Comp. Center, Num. Model. Atmos., Ocean, and Environ. Studies, 2014, vol. 14, pp. 55—72.
- 56. Platov G., Krupchatnikov V., Martynova Yu., Borovko I., and Golubeva E.** A new Earth's climate system model of intermediate complexity, PlaSim-ICMMG-1.0: Description and performance. — IOP Conference Ser.: Earth Environ. Sci. 96 011002, 2017.
- 57. Webb R. S., Rosenzweig, C. E., and Levine E. R.** Specifying land surface characteristics in general circulation models: Soil profile data set and derived water-holding capacities. — Global Biochem. Cycles, 1993, vol. 7, pp. 97—108.