

На правах рукописи



Муравьев Анатолий Владимирович

**РЕЖИМЫ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И
ДОЛГОСРОЧНЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология и
агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2006

Работа выполнена в Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре Российской Федерации Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор
Васильев Петр Петрович

Доктор физико-математических наук, профессор
Чавро Анатолий Иванович

Доктор физико-математических наук
Галин Михаил Борисович

Ведущая организация:

**Главная геофизическая обсерватория
им. А.И. Воейкова**

Защита состоится «26» апреля 2006 г. в «14» час. на заседании диссертационного совета Д 327.003.01 по присуждению ученой степени доктора наук при Гидрометеорологическом научно-исследовательском центре Российской Федерации, 123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 11 -13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации

Автореферат разослан «__» марта 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор географических наук

 Нестеров Е.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Долгосрочный прогноз погоды (ДПП), или, точнее, долгосрочный метеорологический прогноз (ДМП), в несколько последних десятилетий остается «главной задачей современной метеорологии» (А.С.Монин, 1969). Важными составляющими данной проблематики являются и унаследованные «классические», и возникшие в последние годы новые задачи. Среди таких задач можно выделить определение «типичного» долгого срока прогноза и соответствующих циркуляционных режимов, выделение статистических характеристик атмосферных процессов и явлений с долгосрочной предсказуемостью, оценку устойчивости циркуляционных типов, использование ансамблей прогнозов, разработку и внедрение информативных оценок качества прогностической продукции.

Научный прогресс в метеорологии и растущие технологические возможности приводят к постановке новых задач в ДМП. Для их решения применяются методы самых разных научных дисциплин, включая, например, теорию динамических систем, синергетику и теорию экономических рисков.

Более активно искать пути решения проблем ДМП, какими бы сложными они не представлялись, заставляют явные признаки глобальных изменений климата в последние десятилетия и соответствующее усиление влияния короткопериодных колебаний климата на крупномасштабные синоптические процессы. К проявлениям таких изменений можно отнести, например, Эль-Ниньо 1997 г. и его последствия, засухи в Европе и наводнения в южной части России летом 2002 г., обострившуюся активность тропических циклонов в Атлантическом океане в 2005 г., рекордные зимние холода над Евразией в 2006 г.

Мировое метеорологическое сообщество все более активно побуждает политиков и лиц с правом принятия решений учитывать возникающие природные вызовы. Важную роль играют исследовательские программы ВМО (DEMETER, THORPEX) и международные программы с региональной спецификой (программа APCN для Азиатско-Тихоокеанского региона). Плодотворную научную и методическую работу в данном направлении проводят все основные мировые метеорологические и прогностические центры, академические университетские круги и частные исследовательские структуры. Благодаря ИНТЕРНЕТ задачи разработки общих проектов, планирование рабочих встреч и размещение совместных ресурсов в виде банков знаний и данных стали в последние годы выполнимыми в реальном

режиме времени.

Научная и практическая значимость сформулированной темы исследования заключается в использовании понятия крупномасштабного циркуляционного режима в принципиальной схеме «анализ – моделирование – прогноз – оценка качества» по всей ее вертикали. Такой подход приводит, во-первых, к более точному представлению о режимах циркуляции с их периодами зарождения, развития и разрушения, а также о переходах между выделенными режимами. Во-вторых, регулярный прогноз в сочетании с целенаправленными численными экспериментами обеспечивает «обратную связь» между практикой и моделированием, что позволяет формулировать требования, которым должна отвечать гидродинамическая модель, используемая в прогнозе на удлинённый срок. Очевидно, что формулировка таких требований побуждает специалистов численного моделирования совершенствовать основные характеристики моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) и океана (МОЦО), и, в первую очередь, блоки физических параметризаций.

Цель работы и основные задачи исследования

Цель диссертации заключается в разработке *методологии* долгосрочного метеорологического прогноза на основе представлений о *циркуляционных режимах* как составных элементах *низкочастотной изменчивости* атмосферы и *реализация* на базе разработанной методологии *схемы месячного прогноза* с учетом неопределенности начальных данных и неточности моделей. Циркуляционный режим определяется набором следующих характеристик: статистический характер, крупномасштабность, пространственная локализованность, долгопериодность статистик, равновесность синоптического и планетарного масштабов, эквивалентно-баротропная структура. Низкочастотная изменчивость атмосферы проявляется в чередовании выделенных режимов циркуляции.

Конкретные задачи исследования заключались в следующем:

1. Определение и интерпретация циркуляционного режима как основного погодообразующего элемента низкочастотной изменчивости атмосферы; разработка на этой основе методов идентификации режимов циркуляции с их последующим внедрением.

2. Оценки устойчивости, сопряженности и предсказуемости режимов атмосферной циркуляции по данным наблюдений и по результатам гидродинамического моделирования.

3. Реализация схемы гидродинамико-статистического метеорологического прогноза на основе ансамблей, статистического постпроцессинга и синоптического анализа.

4. Разработка методов вероятностной интерпретации, оценок качества прогнозов и схем коррекции систематических ошибок.

В качестве фактических данных использованы архивы наблюдений кораблей погоды, архивы ВНИИГМИ-МЦД и ААНИИ, оперативные базы и архивы Гидрометцентра России, реанализы NCEP/NCAR США. Модельные и прогностические данные были получены по иерархии МОЦА разного класса: от простой квазибароклиной до глобальной оперативной.

Исследования проведены с использованием методов теории вероятностей, математической статистики, теории динамических систем и гидродинамического моделирования. Используются приемы перекрестных проверок (кроссвалидация) и рандомизации данных, имитационные схемы, спектральная и вэйвлет-фильтрация, а также современные оценки качества моделирования и прогнозирования.

Основные научные результаты и их новизна

1. Сформулирована концепция циркуляционных режимов как составных элементов низкочастотной изменчивости атмосферы, представляющих собой основной предмет долгосрочного метеорологического прогноза на интервале увеличенной заблаговременности (до месяца).

2. По данным наблюдений и по результатам гидродинамического моделирования получены новые оценки основных характеристик режимов: устойчивости, географической локализованности, пространственной сопряженности и предсказуемости.

3. Впервые в России разработана и внедрена в оперативную практику режимо - ориентированная адаптивная гидродинамико - статистическая схема прогноза осредненных метеорологических полей и станционных значений температуры приземного воздуха с использованием ансамблей начальных данных и прогностических методик.

4. Впервые в России разработаны и внедрены а) схемы априорных оценок информативности гидродинамического прогноза на среднесрочном интервале и б) вероятностные методы оценки качества моделирования и прогнозирования циркуляционных режимов на интервале увеличенной заблаговременности.

Наряду с основными проблемами решены также и частные проблемы, связанные, в первую очередь, с неравномерными данными, короткими временными рядами, с разнообразием критериев аналогичности, а также с наличием систематических ошибок и трендов в используемых МОЦА. Полученные решения частных задач являются авторскими и составляют новизну методологического подхода диссертанта.

Практическая значимость работы

Диссертация представляет собой результат завершенных исследований в рамках ведомственных НИР и исследовательских тем научного центра – Гидрометцентр РФ: «Развить метод гидродинамического долгосрочного прогноза крупномасштабных метеорологических аномалий с использованием статистической информации о низкочастотной изменчивости и предсказуемости различных режимов атмосферной циркуляции» (1995); «Разработать автоматизированную технологию месячного прогноза крупномасштабных аномалий атмосферной циркуляции на основе комплексного гидродинамико-статистического метода» (1997); «Динамико-статистический прогноз декадных и месячных метеополей с априорной оценкой качества» (1998); «Численные эксперименты по выявлению условий, определяющих развитие устойчивых и неустойчивых атмосферных процессов на месячных интервалах времени» (1999), «Методики априорного оценивания качества долгосрочных прогнозов погоды на основе критериев устойчивости развития долгопериодных атмосферных процессов» (2000), «Исследование низкочастотной изменчивости и предсказуемости системы атмосфера-океан-суша для целей долгосрочного прогнозирования погоды и короткопериодных колебаний климата» (2001), «Численные эксперименты по исследованию относительной роли собственной и вынужденной изменчивости системы атмосфера - подстилающая поверхность на месячных и сезонных масштабах времени для конкретных макросиноптических условий» (2002-2003), «Численные эксперименты по воспроизведению процессов блокирования в атмосфере средних широт Северного полушария» (2004).

По теме диссертации выполнялись проекты Российского Фонда Фундаментальных Исследований, гранты 96-05-64000, 99-05-64362, 02-05-64655 и два гранта для молодых специалистов; в развитие некоторых проблем были подготовлены и успешно защищены две кандидатские диссертации.

Результаты исследований автора, включая программное обеспечение, применялись с 1983 г. в соответствующих блоках вероятностного статистического прогноза средних месячных значений приземной температуры воздуха по Северному полушарию на основе групповых аналогов (схема ГРАН, Груза, Ранькова).

По результатам авторских и оперативных испытаний в 2000 г. была внедрена и эксплуатируется по настоящее время в оперативном режиме комплексная гидродинамико - статистическая схема средних за 10, 20 и 30 суток метеорологических полей Северного полушария (геопотенциал,

температура воздуха, давление на уровне моря) и погодных элементов (температура и в экспериментальном режиме осадки) по станциям бывшего СССР (решение ЦМКП Росгидромета от 10.10.2000 г., № 140-2654).

Опыт развертывания численных схем ансамблей моделей и методик, внедрения методов визуализации и оценок качества прогноза крупномасштабных циркуляционных режимов и метеорологических полей положен в основу соответствующих разделов темы НИР Росгидромета (2005-2007гг.) по разработке оперативной технологии вероятностного сезонного прогноза метеорологических условий. С целью создания мультимодельного сезонного прогноза в данной теме принимают участие глобальные модели ГГО им. Воейкова и Института вычислительной математики РАН.

Аппробация работы

Результаты диссертационной работы изложены в 40 публикациях. Из них в журналах Известия РАН, Физика атмосферы и океана (2), Метеорология и гидрология (15), в изданиях ВМО и зарубежных исследовательских центров (7), в трудах ВНИИГМИ-МЦД и Гидрометцентра (9), в тематических сборниках Росгидромета (6), а также в материалах национальных и международных конференций.

Основные положения диссертационной работы докладывались на сессиях, оперативно-производственных совещаниях Росгидромета и Гидрометцентра России, на семинарах Института вычислительной математики РАН (1994), кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ им. Ломоносова (1996, 1998), Московского географического общества (1999).

Результаты диссертации были представлены на отечественных и международных конференциях: «IV Всесоюзная конференция по статистической интерпретации гидродинамических прогнозов» (Одесса, 1991), «Конференция с международным участием по математическим методам распознавания образов, посвященная 60-летию акад. РАН Ю.И. Журавлева» (Пущино, 1995), «Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды» (Москва, 1996); «VIII Всероссийская конференция по математическим методам распознавания образов» (Москва, 1997), «WMO International Workshop on DERF» (Тулуза, Франция, 1997), Всероссийская научная конференция «Проблемы и перспективы гидрометеорологических прогнозов» (Москва, 2000); Международная конференция по интеллектуализации обработки информации (Алушта, Крым, 2000), «The WMO Workshop on use of ensemble prediction systems» (Пекин, Китай, 2000), «The 6th General Assembly

of the European Geophysical Society» (Гренобль, Франция, 2001), «The first APEC Climate Network Working Group Meeting» (Сеул, Южная Корея, 2001), «Всемирная конференция по изменению климата» (Москва, 2003), «Научная конференция, посвященная 100-летию И.А. Кибеля и 170-летию Гидрометеослужбы России» (Москва, 2004), «Всероссийская научная конференция, посвященная 100-летию С.П. Хромова» (Москва, 2004), «The WMO/NCER/HPC Workshop on a proposed Hydrometeorological Testbed» (Вашингтон, США, 2005).

Личный вклад автора

Основные результаты получены автором лично и в соавторстве при выполнении тем НИР и ОКР Росгидромета по долгосрочному прогнозу погоды, планов работ Государственного научного центра «Гидрометцентр России», в ходе выполнения проектов РФФИ, а также при подготовке статей и выступлений на конференциях и конгрессах по проблемам, составляющим содержание диссертации.

Автор принимал участие в совместных работах как руководитель проектов, ответственный исполнитель или соисполнитель. Важнейшие работы, опубликованные в журналах и ведомственных изданиях, были выполнены по инициативе диссертанта. Основные теоретические и методические результаты получены диссертантом лично.

Перевод моделей общей циркуляции атмосферы на платформы персональных ЭВМ, в вычислительные среды больших ЭВМ, а также эксплуатация МОЦА производились под руководством или при непосредственном участии диссертанта. Основные блоки комплексной оперативной схемы гидродинамико-статистического месячного прогноза осредненных полей и элементов разработаны, запрограммированы, отлажены и внедрены либо лично автором, либо под его непосредственным руководством.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем работы 321 стр., включая 29 таблиц и 80 рисунков. Список литературы составляет 434 названия.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность проблемы, формулируются цель и основные задачи исследования, дается краткое изложение диссертации.

Глава 1. РЕЖИМЫ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Данная глава носит обзорный характер, но имеет принципиальное значение для обоснования предложенного методологического подхода к решению проблемы ДМП.

В разделе 1.1 приводятся определения общей циркуляции атмосферы (ОЦА), которая является основным объектом долгосрочного метеорологического прогноза (Лоренц, 1970; Монин, 1969). Приводятся основные представления о крупных масштабах атмосферной циркуляции и о методах статистического описания многокомпонентных процессов и полей.

Для анализа ОЦА как статистического ансамбля крупномасштабных процессов Лоренц ввел понятия *транзитивности*, *интранзитивности* и *почти интранзитивности* атмосферной циркуляции. Он же отметил, что существенная нелинейность атмосферных процессов не исключает некоторой периодичности решения. При этом количество существенно различных типов (форм) циркуляции ограничено и этим самым обеспечивается их повторное появление в общих чертах.

Наиболее обоснованный анализ эволюции ОЦА заключается в использовании балансовых соотношений для главных метеорологических характеристик, в первую очередь, момента количества движения, энергии и влаги. Задача исследователя заключается в том, чтобы на основе данных о притоке тепла в атмосферу и о свойствах основных сред системы выяснить рабочие механизмы преобразования разных видов энергии, переносов энергии и момента, и с помощью полученных соотношений выявить природу и эволюцию возникающих циркуляционных форм.

В схеме взаимодействия разномасштабных элементов ОЦА большое значение имеет взаимодействие процессов двух главных диапазонов полного спектра – *планетарного* и *синоптического*. Современные представления энергетического анализа и взаимодействия разных масштабов были заложены в работах В. Бьеркнеса и Россби (1930-1940-е). Россби предположил, что синоптические вихри способны суммарно, или статистически, переносить момент импульса в широтные зоны с наибольшими западными ветрами, т.е. действовать как *отрицательная вязкость*, питая кинетической энергией осредненную зональную циркуляцию. Сами синоптические вихри образуются вследствие бароклинной неустойчивости осредненной зональной циркуляции, питаясь ее потенциальной энергией. Отрицательная вязкость представляется как основной механизм, уравнивающий *квазидвумерные* движения планетарного и

синоптического масштабов. Указывается на согласованность пространственных и временных масштабов атмосферных явлений (*скейлинг*), что было обнаружено вначале *Ричардсоном* и позже объяснено *Обуховым* и *Колмогоровым*.

Именно на основе энергетических соображений, с учетом особенностей земной поверхности, переносов и разных видов неустойчивости *Ван Мигем* (1960) дал типизацию квазигоризонтальных движений по трем классам: квазистационарные планетарные волны (волновые числа $m = 1 - 4$), длинные движущиеся и неустойчивые волны ($m = 5 - 10$), быстро движущиеся волновые возмущения умеренных широт ($m > 10$).

В разделе 1.2 приводятся различные спектральные определения циркуляционных режимов с учетом того, что для квазигоризонтальных движений спектральный анализ приобретает наиболее простой вид – интеграл Фурье можно заменить рядом Фурье с дискретным набором волновых чисел. Особенностью двумерной («геострофической») турбулентности является наличие двух фундаментально различных режимов движений с законами $(-5/3)$ и (-3) в логарифмической шкале «волновое число – плотность энергии» (*Fjoertoft*, 1953; *Kraichnan*, 1967; *Leith*, 1971). При этом существует некоторое среднее волновое число, относительно которого кинетическая энергия переносится только вниз по волновым числам, а энтропия – только вверх. Использование других соображений может привести к детализации режимов геострофической турбулентности (*Шакина и др.*, 1988, 1990). Помимо зональных волновых чисел возможно использование двумерных (планетарных) волновых чисел, возникающих при разложении метеорологических полей по сферическим гармоникам. При этом возникают другие нелинейные каскады и наклоны логарифмических спектров (*Wiin-Nielsen*, 1972; *Baer*, 1981).

В разделе 1.3 излагаются основные положения теории низкочастотной изменчивости атмосферы и дальних связей (*телеконнекций*) с выделением географически локализованных очагов экстремальной дисперсии в высоко- и в низкочастотных диапазонах. Эти очаги известны в синоптической метеорологии как *шторм-треки* и области формирования *блокирующих ситуаций* (*блокингов*). Низкочастотный диапазон охватывает типичные колебания с периодом, превышающим интервал динамической предсказуемости (около 10 суток); при этом выделяются два подпериода – от 10 суток до месяца и периоды с месячной дискретностью.

Приводятся известные конфигурации телеконнекций в поле геопотенциала 500 гПа в зимний период по Северному полушарию (*Wallace, Gutzler*, 1981). Отмечается разнообразие методов выделения типов дальних связей: с помощью естественных ортогональных функций (ЕОФ), повернутых

ЕОФ (ПЕОФ), типов главных колебаний, нормальных мод и т.д.. Дается краткий обзор исследований телеконнекций, проведенных в отечественной метеорологии (*Марчук, 1983; Галин, Киричков, 1986; Лыкосов, 1987; Дымников, Толстых, 1989*).

В разделе 1.4 анализируется ключевое для диссертации понятие циркуляционного (или погодного) режима, история которого в динамической метеорологии прослеживается с работы *Лоренца (1963)*. В определении понятия режима циркуляции ключевыми являются крупномасштабность, долгопериодность (длительное существование во времени осредненных характеристик) и географическая локализованность. Принципиальным механизмом формирования режима является нелинейное взаимодействие масштабов движения (*Charney, DeVore, 1979; Charney, Straus, 1980; Reinhold, Pierrehumbert, 1982; Tung, Rosenthal, 1985; Галин, Киричков, 1986; Дымников, Филатов, 1990; Molteni et al., 1990; Дымников и др., 1992; Itoh, Kimoto, 1996; Black, 1997; Itoh, Kimoto, 1999*).

Обсуждаются такие проблемы, как идентификация циркуляционных режимов; механизмы их зарождения, поддержания и разрушения; взаимосвязь с понятиями теории динамических систем (стационарные решения, автоколебания, аттракторы, устойчивые и неустойчивые многообразия); возможность «динамической парадигмы» - объяснения климатических изменений на основе статистических характеристик циркуляционных режимов; особенности географических локализаций; переходы между режимами как динамическая причина низкочастотной изменчивости.

В разделе 1.5 приводится исторический обзор понятий *макросиноптического положения* и *макросиноптического процесса*, ставших ключевыми как в синоптической метеорологии, так и в синоптическом долгосрочном прогнозе погоды (*Тейсеран-де-Бор, Мультиановский, Баур, Виллет, Вангенгейм, Гирс, Дзердзеевский, Хромов, Россби, Нэмайес, Пагава, Таборовский*). Понятийный аппарат синоптической метеорологии оказался очень плодотворным для динамической метеорологии в эпоху численного прогнозирования и экспериментирования.

В разделе 1.6 обсуждается проблематика предсказуемости и возможности гидродинамического прогнозирования циркуляционных режимов на внутрисезонных интервалах; в дальнейшем такие прогнозы для краткости называются *удлиненными* прогнозами, или прогнозами на *увеличенных* сроках (DERF).

Предел динамической предсказуемости относится к *мгновенным состояниям* атмосферы. Однако, во-первых, существуют медленные атмосферные флуктуации (блокинги, колебания в телеконнекциях, колебания

Джулиана-Маддена, фазы Эль-Ниньо и Южного колебания, квазидвухлетняя цикличность), а, во-вторых, имеет место более длительная эволюция статистических характеристик крупномасштабных циркуляционных структур (в основном первых статистик).

Качество прогноза на увеличенных сроках зависит от таких факторов, как прогнозируемый элемент, заблаговременность и сезон, характеристики пространственно-временной фильтрации, географический регион, развивающиеся синоптические ситуации, климатические межгодовые особенности. Одна из основных трудностей в ДМП связана с разделением роли внутренних динамических механизмов атмосферной циркуляции и внешних условий на различных интервалах прогноза.

Рассматривается определение прогнозов на месяц и сезон, основанное на понятии режима циркуляции (*Palmer, 1999*). На протяжении месяца малое количество перестроек режимов делает месячный прогноз информативным в той мере, в которой информативно предсказание фаз процессов (зарождение – развитие –разрушение). На сезонных интервалах количество сменяющихся режимов может оказаться достаточным для прогнозирования статистических характеристик режимов, например, частот, средней продолжительности, средней интенсивности и, возможно, вероятности переходов.

В конце раздела дается описание схем прогноза на месяц и сезон в главных метеорологических центрах мира (США, Англия, Япония, ЕЦСПП).

В разделе 1.7 излагается методология и технология ансамблевого прогноза, который может считаться реализацией динамико-стохастического предсказания. Указывается, что в ДМП необходим учет неточности и неполноты наблюдений, а также несовершенства используемых МОЦА и МОЦО. Рассматривается предсказуемость первого и второго типа при оценке потенциала моделей в практике ДМП и при анализе роли отдельных факторов атмосферной изменчивости, соответственно. Строится схема, демонстрирующая роль стохастичности на разных интервалах: от экспоненциального роста начальной ошибки до хаотичного заполнения траекторией области климатического аттрактора.

Глава 2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Понятие плотности распределения характеристик в фазовом пространстве динамической системы используется для статистического определения циркуляционных режимов как кластеров (*Molteni et al., 1990*). Кластеры фазовых точек выделяются на основе некоторых метрик, эволюция близких точек характеризует эмпирическую предсказуемость атмосферных

процессов (Lorenz, 1969). Исследование таких вопросов проводится в диссертации по полным матрицам сходства или различия для выделенных метеорологических объектов. Основными проблемами здесь являются идентификация объектов, выделение подходящих операторов сходства или аналогичности, оценки статистических свойств полученных характеристик. Такие проблемы наиболее отчетливо формулируются и наиболее полно решаются в схемах вероятностных метеорологических прогнозов (Груза, Ранькова, 1981).

В разделе 2.1 исследуются методические вопросы построения метеорологических объектов из многокомпонентных рядов наблюдений. В работах диссертанта (1990 – 1996 гг.) была проведена классификация основных процедур построения объектов по данным архивов наблюдений и описаны преобразования статистических характеристик полученных объектов. Рассмотрены такие процедуры, как сечение и интерполяция, центрирование и нормализация, взвешенное суммирование, нелинейные функциональные преобразования и выделение компонентов аддитивной модели процесса. Рассмотрены преобразования основных статистических характеристик полученных объектов: средние, экстремальные значения, ковариации и корреляции, автоковариации и автокорреляции. В разделе перечислены нетривиальные модификации статистических характеристик при таких преобразованиях (Муравьев, 1990). Среди них наиболее важно влияние преобразований на ковариационные особенности, которые проявляются, например, в эффекте Слуцкого-Юла при переходе к накопленным суммам.

В разделе 2.2 анализируются многокритериальные показатели аналогичности метеорологических объектов, используемые как для выделения кластеров сходных объектов, так и для анализа предсказуемости по группам аналогов. Дается общее определение показателя сходства через понятие функционала на множестве пар объектов. Указывается на неантисимметричность понятий сходства и различия, что приводит к необходимости учитывать наличие таких пар объектов, которые могут называться аналогами, неаналогами, контраналогами, антилогами, сильно сходными, слабо сходными и проч. (Груза и др., 1976, Van den Dool, 1991).

Диссертантом было проведено группирование используемых в метеорологической практике показателей сходства/различия (Муравьев, 1990, 1994): 1) метрики и функции от метрик, 2) ковариации и их комбинации, 3) информационные показатели, 4) дельта-показатели и 5) алгебраические показатели. Диссертантом проведены исследования всех указанных групп и их соотношений. Многие используемые в практике показатели аналогичности являются модификациями других показателей: например, квадрат евклидовой метрики (симметрики) и элементы двухвходовой таблицы сопряженности.

Показатель дельта-типа был введен диссертантом как наиболее общий показатель, к которому могут быть сведены многие другие: метрики, квадраты метрик, ранговый параметр ρ .

В разделе рассматривается проблема оценки аналогичности в условиях многокритериальности. Часто используются алгебраические комбинации функционалов (свертки), приводящие к утере информации. Наиболее полный учет информации возможен при постановке задачи в терминах теории операций и при ранжировании показателей с помощью *недоминируемых альтернатив*, или множества Парето.

В разделе 2.3 вводится и анализируется понятие *чувствительности* показателей аналогичности, отражающее способность различения конкретных объектов при выделенных преобразованиях исходных данных и при заданных пределах погрешности. В качестве оценки чувствительности рассмотрен коэффициент вариации функционала сходства. Диссертантом проанализированы свойства чувствительности *квадрата евклидовой метрики* (симметрики) при всех перечисленных преобразованиях. Указывается на связь *чувствительности* показателя с его статистической *устойчивостью*, или *робастностью*, при малых отклонениях в распределении основной выборки (Хьюбер, 1984).

В разделе 2.4 рассмотрена проблема *эквивалентности* показателей аналогичности в условиях многокритериальности. Теоретически такая постановка вопроса аналогична проблеме *эквивалентных норм* в функциональных пространствах. В конкретной ситуации определение эквивалентности зависит от рассматриваемых метеорологических объектов, которые всегда могут быть описаны конечномерными статистиками *номинального, порядкового или числового* типов.

Для предикторов и предиктантов схемы ГРАН вероятностного прогноза были построены полные матрицы сходства/различия, а их эквивалентность оценена на основе построчных ранговых и простых корреляций, а также с помощью построчных средних. При этом по строкам располагаются значения выбранного показателя аналогичности со всеми остальными объектами, которые могут относиться к тому же месяцу, но к разным годам. В диссертации приводятся примеры проведенного анализа для полей нормированных аномалий среднемесячных температур воздуха по 45 квадратам Северного полушария, поля нормированных аномалий и натуральных значений температур воздуха по станциям СССР в интервале 1891 – 1981 г. Используются такие показатели, как *евклидова метрика*, *среднее абсолютное различие*, *нормированное евклидово расстояние*, *коэффициент корреляции* и *показатель ρ* .

В общей сложности проанализировано 14 полных матриц

аналогичности. Результат показал, что для некоторых выделенных объектов и показателей рассчитанная эквивалентность по коэффициенту простой или ранговой корреляции превышает 0.85. При этом эквивалентность некоторых показателей (евклидова метрика и среднее абсолютное различие) может быть доказана аналитически, другие же пары показателей могут обнаружить эквивалентность только при конкретном расчете.

Важнейшим выводом проведенного расчета оказался существенный сезонный ход интегральной аналогичности, что было использовано для оценок климатической однородности осредненных полей температуры приземного воздуха (WT45).

Выделение интервалов однородности важно для расширения объема выборок при прогнозе методом групповых аналогов. Например, при вероятностном прогнозе январских полей температуры можно использовать весь зимний сезон, утроив объем выборки, чего нельзя сделать, например, с октябрем. Другими словами, если существует выраженный внутрисезонный ход интегральной аналогичности, расширение выборки за счет соседних месяцев недопустимо.

С другой стороны, междугодовое изменение интегральных параметров аналогичности можно использовать для оценок климатических трендов: так, сравнение изменений оценки эквивалентности между средней абсолютной метрикой и пространственно-нормированным евклидовым расстоянием дало количественное подтверждение глобальной перестройки осредненных полей температуры воздуха к концу 1970-х при одновременном сохранении пространственной изменчивости (рис.1).

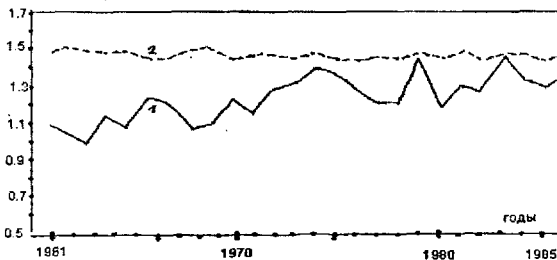


Рис.1. Тренд интегральной аналогичности апрельских полей WT45 по средней абсолютной (1) и пространственно нормированной евклидовой метрике (2).

В разделе 2.5 рассмотрена проблема малых и неравномерно распределенных выборок, влияющих на устойчивость статистик. При архивировании, обработке и расчете климатических характеристик данных

кораблей погоды указанная проблема была сформулирована в общем виде и решена в применении к скалярной скорости ветра. Был использован метод случайного тестирования (Фишер, 1935) с *равномерным, последовательно-непрерывным* и *нормально распределенным* моментами наблюдений.

Проблема значимости получаемых оценок среднего значения временного ряда решена при заданной ковариационной структуре. Если считать выполненными свойства соответствующих интегралов Лебега-Стилтьеса, то проблему можно переформулировать в терминах собственных значений для заданных корреляционных ядер в гильбертовом пространстве функций. В разделе показано приложение к простейшей корреляционной функции $R(\tau)$, зависящей только от интервала времени τ между моментами наблюдений. Для собственных функций данного корреляционного ядра выписано дифференциальное уравнение второго порядка, решение которого приводит к уравнению для собственных чисел. При расчете средней ряда для случая нормального распределения моментов наблюдений с заданной дисперсией σ выведено неравенство, связывающее уровень погрешности δ , длину интервала наблюдений T и параметр затухания корреляционной функции α при заданном распределении $p(x)$ точек наблюдения:

$$e^{\alpha^2 T/\sigma^2} > \frac{1 + \sqrt{1 + 4C^2}}{2C}, \quad C = C(\alpha, T, \delta, \sigma); \quad p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}, \quad R(\tau) = e^{-\alpha|\tau|}.$$

В разделе 2.6 рассмотрены непараметрические оценки сходства выборок по простейшей статистике доли пересечения (C). Получены явные формулы распределения $F_C(u)$ для переменной C на основе теоремы Гнеденко о распределении экстремальных величин. В статье (Муравьев, 1990б) показано, что интегралы от соответствующих плотностей зависят от функций Бесселя K первого рода. С помощью рекуррентных свойств, связывающих эти функции, получена аналитическая формула:

$$F_C(u) = 2m^2 \sum_{\nu=0}^{m-1} \sum_{\mu=0}^{m-1} \binom{m-1}{\nu} \binom{m-1}{\mu} (-1)^{\nu+\mu} \left(\int_1^{\infty} \int_0^1 K(m, \nu, \mu, x, y) dy - \int_1^{\infty} \int_0^1 K(m, \nu, \mu, x, y) dy \right) + m \int_{2m}^{\infty} K_0(y) dy.$$

где $K(m, \nu, \mu, x, y)$ – некоторая функция, зависящая от функции Бесселя и параметров задачи, m – количество степеней свободы исходной выборки.

В разделе 2.7 предложены методы расчета спектров коротких рядов без рандомизации, но с постулированием некоторой модели процесса (Муравьев, 1992а). Используется метод максимальной энтропии с представлением исходного ряда x_t как авторегрессионного процесса с *переменным шумом* η_t :

$$x_t = \eta_t + a_1 x_{t-1} + \dots + a_m x_{t-m}$$

В качестве входных параметров использованы *длина ряда T* и *порядок авторегрессии m* . Переменный шум определяется порядком авторегрессии, который интерпретируется как *линейная память* процесса.

Показано, как можно оценить зависимость оценки дисперсии остаточного шума от порядка авторегрессии в предположении процесса указанного типа. Ввиду того, что универсального способа определения этого порядка в общем случае не существует, предложена схема *вычислительных экспериментов*, или *схема имитации*, позволяющая конструировать *фазовые портреты пиков* спектральной плотности. Предложенная схема анализа применена к оценке характеристик спектральной плотности кинетической энергии в средней тропосфере в индийской муссонной зоне, полученной в результате моделирования сезонных условий с помощью модели класса T21L15. В частности, выделены устойчивые 19- и 10-суточные пики в спектральной плотности. Показано, что критерии *Акаике* и *Парзена* оценок порядка авторегрессии приемлемы лишь в идеализированных условиях больших объемов выборки.

В разделе 2.8 анализируются методы фильтрации модельных трендов, которые возникают при длительных интегрированиях (*Муравьев, Тросников, 1993а,б*). В метеорологии для разделения высоких частот и низких используется *фильтр Блэкмона*. При анализе реальных (или модельных) геофизических процессов частотные характеристики данного фильтра могут быть не достаточно обоснованными. С помощью оценки эквивалентности энергетических спектров диссертантом показано, что фильтр Блэкмона может быть заменен полиномиальным фильтром порядка 2-3 с шириной окна в 11 суток. Данный фильтр опробован для выделения и устранения модельных трендов в полях высот 500 гПа при интегрировании на сезонных интервалах модели класса T21L15. Показано, что получаемые структуры полей Северного полушария после удаления тренда вполне соответствуют реальным, в то время как в Южном полушарии такая процедура не корректна – удалить тренд не удастся. В последнем случае проблема может быть разрешена модификацией параметризаций МОЦА.

При анализе предсказуемости второго рода в условиях аномальной температуры поверхности океана (ТПО) оценка тренда произведена с помощью непараметрических характеристик на основе *критерия серий* (*Муравьев, 1995б*). Тренды были оценены для отдельных интервалов интегрирования, что представляет собой вариант *перекрестных проверок* в обработке данных. Проведенная серия экспериментов с МОЦА T21L15 на данных ПГЭП 1979 г. имела целью оценить влияние возможного выхолаживания на особенности глобальной циркуляции. Оценка наличия

тренда и его удаление с помощью полиномиального фильтра позволили сделать вывод, что в Северном полушарии при заданном режиме выхолаживания наблюдается смещение штурм-треков к южным широтам.

Глава 3. УСТОЙЧИВОСТЬ, СОПРЯЖЕННОСТЬ И ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

В разделах 3.1 приводятся результаты анализа фактических данных, собранных в архивах ВНИИГМИ-МЦД и в архиве реанализов полей Северного полушария NCEP/NCAR (США).

В разделе 3.1.1 излагаются результаты анализа интегральных характеристик аналогичности для средних месячных полей нормированной приземной температуры воздуха с осреднением по 45 квадратам Северного полушария. Полные матрицы формировались для *коэффициента корреляции, среднего абсолютного различия, средней евклидовой метрики и нормированного евклидова расстояния*. Заметный тренд в средних значениях метрических различий полей одноименных месяцев для января и июня приводит к выводу, что за последние 25-30 лет XX столетия появляется все большее количество полей, которые в метрическом смысле заметно отличаются от предыдущих.

Эволюция характеристик аналогичности внутри года оценивается по траектории и компактности групп аналогов, что при анализе полных матриц сводится к анализу *условных статистик*. Само понятие аналогичности определяется с помощью *переменных порогов сходства*. Данный подход представляет собой широкое обобщение идеи *Лоренца (1969)* об оценках эмпирической предсказуемости. В результате проведенных оценок получено, в частности, что априорно неблагоприятными в качестве *исходных* месяцев для прогноза методом групповых аналогов являются январь, февраль, март, апрель, сентябрь и октябрь, а в качестве *прогнозируемых* – февраль, март, май, июнь и декабрь.

Оценены *интервалы климатической однородности* для расширения выборки предикторов. В частности, получено, что выборки меридиональных профилей температуры в месячном осреднении по Северному полушарию можно дополнять соседними 2-3 месяцами в летний и зимний периоды, в то время как увеличение выборок в переходные сезоны увеличивает возможную ошибку (по средней квадратической оценке) почти вдвое. Для нормированных аномалий полей приземной температуры с осреднением по 45 квадратам Северного полушария увеличение интервала однородности на 2-3 месяца возможно для всего года.

В разделе 3.1.2 применяются методы теории распознавания образов

для идентификации волн в полях высот 500 гПа. Исследуется возможность наиболее экономного представления полей с помощью *характерных изогипс*, которые в синоптической практике проводятся по осевой линии планетарной высотной фронтальной зоны. Такой подход используется для оценок бимодальности распределения амплитуд планетарных волн (*Tibaldi, 1990; Груза, Ранькова, 1996*), а также в синоптической практике глобального анализа (*Педь, 1972*). Так, синоптики принимают в качестве характерной для января изогипсу 544 дам.

Результаты выделения характерных изогипс для января применены к архиву реанализов NCEP/NCAR по периоду 1967 – 1987 гг. и сопоставлены с тремя формами циркуляции *Вангенгейма-Гирса* для Северного полушария. В качестве критерия близости использованы среднее абсолютное различие, коэффициент корреляции и параметр ρ , рассчитываемые в координатах широт по каждой долготе пятиградусной сетки.

Получены статистические характеристики средней продолжительности циркуляционных типов и вероятностей переходов между разными типами. Объективная классификация оказалась более чувствительна к мелкокомасштабным изменениям поля геопотенциала 500 гПа: длительность объективных форм оказалась, примерно, в 2.5 раза меньше форм субъективной классификации. Оценка устойчивости показала, что западная фаза (С) обладает свойством возврата примерно после 5 суток. Зональный поток (W) максимально устойчив примерно на протяжении двух недель. Среди *редких переходов* отмечен переход форм E → С. Проведено сопоставление субъективной классификации по десятилетним периодам и с оценками вероятностей переходов (*Байдал, 1974*).

В **разделе 3.1.3** по архиву реанализа суточных полей высот 500 гПа проводится анализ мод изменчивости атмосферной циркуляции и выделяются предшественники *устойчивых* и *неустойчивых* циркуляционных режимов (*Куликова, Муравьев, 1998в*). Методология применяется к *третьему* естественному синоптическому региону Северного полушария (Тихий океан – Северная Америка, регион телеконнекции PNA). Моды изменчивости выделяются с помощью повернутых ЕОФ, или факторного анализа с *варимаксным вращением*. Первые шесть мод интерпретируются по крупномасштабным очагам экстремальных значений в терминах основных синоптических циркуляционных структур. Для анализа устойчивости той или иной конфигурации потока привлекается до девятнадцати мод. Синоптическая устойчивость потока оценивается с помощью *корреляции Кендалла* рангов мод, вычисляемых по абсолютным значениям коэффициентов разложения с последующим анализом знаков. В качестве предшественников рассмотрены осредненные за предыдущие 3-5 суток поля геопотенциала.

Показано, что режимы атмосферной циркуляции носят отчетливый регионально ограниченный характер и формируются под действием разных факторов. Построены сценарии развития устойчивых конфигураций, напоминающих блокирующие ситуации над востоком Америки и западной частью Атлантического океана. Предшественниками таких ситуаций чаще всего являются суперпозиция усиленного западного потока над Тихим океаном и положительной фазой колебания PNA (*Wallace, Gutzler, 1981*). Данное сочетание форм циркуляции, приводящее к формированию устойчивого блока вниз по потоку, напоминает обрушение двумерной волны Россби (рис.2).

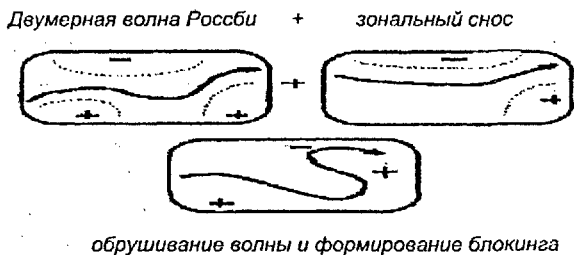


Рис.2. Сценарий формирования устойчивого циркуляционного режима над территорией PNA (3-й естественный синоптический регион).

Такой сценарий может быть описан *нелинейными* уравнениями (типа *Кортевега-Де Фриза*), хотя восстанавливается *кусочно-линейно* с помощью предложенной методики корреляции рангов мод. У неустойчивых ситуаций предшественников в указанном смысле не наблюдается.

В разделе 3.1.4 метод повернутых ЕОФ применяется ко всем естественным синоптическим районам Северного полушария, в результате чего дается оценка пространственной сопряженности локальных режимов циркуляции в разных частях северного полушария (*Муравьев, Куликова, 1998а*). Рассмотрены суточные поля в парах месяцев: январь-февраль и т.д. Используются количественные характеристики, аналогичные *индексам Уоллеса-Гацлера*; количественный анализ проводится на основе таблиц сопряженности, построенных для трех градаций индексов циркуляции. Сопряженность наблюдается для двух конфигураций. Во-первых, для *зональных* процессов над всеми тремя регионами, при этом зональность потока обеспечивается в основном бипольными структурами типа циклон на севере и антициклон на юге (рис.3а). Во-вторых, для конфигурации, сходной с тихоокеанско - американской телеконнекцией (PNA). В последнем случае

наблюдается сопряженность циркуляционных режимов в третьем и втором естественных синоптических регионах, охватывающих Тихий и Атлантический океаны и большую часть Евразии (рис.3б).

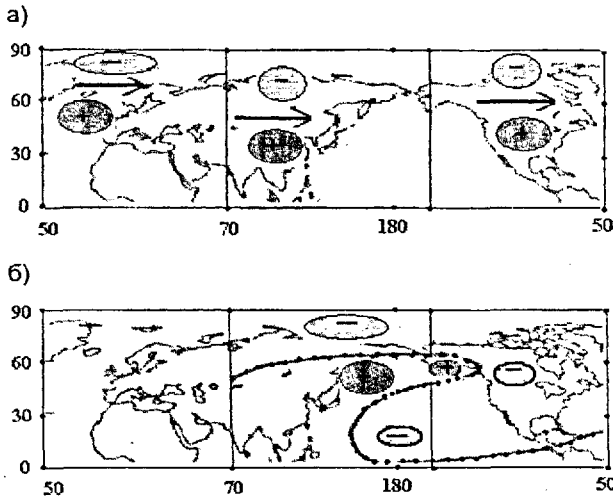


Рис.3. Пространственная сопряженность циркуляционных режимов по полям H500 для января-февраля.

В разделах 3.2 методы выделения циркуляционных режимов и оценок их динамических и морфологических особенностей приложены к иерархии моделей ОЦА.

В разделе 3.2.1 техника выделения *долгоживущих аномалий* применена к баротропной модели с квазибароклинным форсингом (Муравьев, Киктев, 1995в). Сферическое усечение поля функции тока составляет 20 гармоник. Воспроизводится вечный январь, модель интегрируется, примерно на 10 лет с суточной дискретностью. Используется стандартный анализ главных компонент с помощью ЕОФ. К *главным компонентам* применяется методика построения процесса скользящего среднего, порядок порождаемых рядов оценивается максэнтропийно. Оказалось, что кластеры в фазовом пространстве данной модели не порождаются, а соответствующая функция распределения близка к нормальной. Поэтому была проанализирована длительность существования ситуаций по градациям отдельных главных компонент. В зависимости от диапазона значений выделены градации *квазиклимата, слабовыраженной, возбужденной и перевозбужденной мод.* Отмечено, что около среднего состояния система быстро флуктуирует (квазиклимат неустойчив), в то время как возбужденные моды могут

сохраняться более длительно. *Долгоживущие* ситуации выделяются по постоянному сохранению в течение не менее 10 суток одной градации какой-либо из главных пяти первых компонент. Почти половину всех ситуаций удастся классифицировать по режимам, названным *слабая*, *сильная* и *импульсная* циркуляции.

Проводится разделение ситуаций на *благоприятные* и *неблагоприятные* для целей ДМП. В качестве критерия благоприятности используется скорость расхождения траекторий в фазовом пространстве системы. Близость оценивается евклидовой метрикой, анализ проводится по полной матрице функционала близости. Участки фазовой траектории, на которых возможно предсказание на долгие сроки, интерпретируются как устойчивые многообразия динамической системы (направление *нейтральных векторов* по *Мольтени*, 1996). Оказалось, что благоприятная ситуация в смысле ДМП формируется в результате некоторого короткопериодного качания циркуляционных форм.

К данной модели применен метод геометрического анализа временных рядов (*Grassberger, Procaccia, 1983*), позволяющий оценить свойства порождаемого моделью аттрактора. С помощью *корреляционного интеграла*, построенного по функции Хэвисайда, оценены дробные размерности аттрактора, рассчитаны положительные показатели Ляпунова и показаны возможные погрешности в использовании данного подхода к конечным временным рядам (*Муравьев, 1994а*). Показано, что погрешности в расчетах динамических параметров делают более устойчивый автокорреляционный анализ качественно вполне конкурентным рассмотренному методу. Дан пример построения стандартной вероятностной меры на основе корреляционного интеграла.

В разделе 3.2.2 разработанная методика спектральных оценок коротких временных рядов применена к результатам моделирования отклика атмосферы на АТПО в *синоптическом* диапазоне возмущений.

Использована модель класса T21L15, которая интегрировалась по начальным данным ПГЭП за июнь 1979 г. В некоторых регионах Мирового океана вводятся очаги АТПО, которые, согласно численным экспериментам ВЦ АН СССР (*Ганопольский, Сенчиков, 1990*), могут формироваться в результате оптического замутнения атмосферы после возможной ядерной войны. Реакция атмосферы оценивается по суточным полям геопотенциальных высот 500 гПа Северного полушария с исключением первых 30 суток интегрирования. Низкочастотные составляющие удаляются полиномиальным фильтром (*Муравьев, 1993*), анализу подвергаются возмущения с типичным периодом менее 8 суток.

Линейный отклик атмосферы описывается в каждой точке сетки

процессом авторегрессии с *переменным шумом*. Глобальное воздействие АТПО рассчитывается энергетическими спектрами. Показано, что в результате выхолаживания генерируется меридионально ориентированная стационарная волна относительно «контрольного» состояния. Линейный отклик отмечается в основном над океанами. Рассчитано пространственное распределение максимальных пиков, а разность для контрольного и аномального экспериментов интерпретируется как изменение линейной инерции синоптических процессов под влиянием АТПО. Оказалось, что линейная инерция при устоявшейся аномалии ТПО по всему полушарию снижается, однако, над океанами – увеличивается до 1.5-2 суток. При этом линейный отклик характерен в целом для Атлантического океана, а для Тихого океана отклик более разнообразен и не столь однозначен.

В разделе 3.2.3 приводятся оценки потенциальной предсказуемости крупномасштабных аномалий атмосферной циркуляции по модели класса T41L15, накопленные к 2000 г. в рамках авторского испытания схемы гидродинамико-статистического прогноза на месяц (Муравьев и др., 2000).

Результаты численных экспериментов показали, что МОЦА данного класса дает информативный прогноз на первых 5-10 сутках, хотя *возможен* удовлетворительный прогноз вплоть до 20 суток для естественных синоптических регионов (рис.4, СП – Северное полушарие).

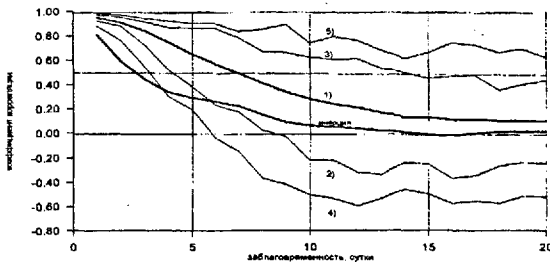


Рис.4. Коэффициент корреляции аномалий (ККА) суточных полей для ежесуточных прогнозов по интервалу 14.11. - 24.12.1996, 45 прогнозов. 1) ККА для СП, 2-3) экстремальные значения ККА для СП, 4-5) экстремальные значения ККА для трех в.с.р.

Таким образом, прогноз осредненных полей на удлинённых сроках возможен только с использованием статистического постпроцессинга (по идее Лоренца, включить модель как нелинейный предиктор в линейную схему).

Интегрирование производится от последовательных дат, что приводит к формированию ансамбля промежуточных полей. Так как предсказуемость процессов существенно зависит от таких факторов, как прогнозируемая величина, характер пространственно-временного осреднения, географический регион и формирующийся климатический фон, то важнейшим звеном в ДМП является *априорное оценивание* качества гидродинамического прогноза. Так

как это качество оценивается интегральными характеристиками, то задача становится аналогичной прогнозу *категорий* (например, *ниже-норма-выше*) в синоптических ДПП. С синоптической точки зрения, это равносильно поиску *предшественников*, или *предвестников* крупномасштабных аномалий (Пагава, 1963). Таким образом, схема априорного оценивания связывает два разнородных масштаба: результаты моделирования мгновенных состояний атмосферы и некоторые осредненные характеристики этих состояний, т.е. *погоду* и элементы *низкочастотной изменчивости* циркуляции.

В конечный набор методик прогноза осредненных полей за 10, 20 и 30 суток были включены следующие методики: 1) динамический прогноз с заблаговременностью 0 - 2 суток (3 методики), 2) динамический прогноз с последующим осреднением по ансамблю (одна методика) и 3) с осреднением по спектрально фильтрованным полям в последующих двух декадах с урезанием T21 и T10, соответственно (одна методика), 4) регрессионная схема с базами 5 и 10 суток (две методики), 5) климатический прогноз по архивам ВНИИГМИ-МЦД и США (одна методика) и 6) инерционный прогноз (одна методика). Всего – девять методик.

Уравнения регрессии составляются поточечно для полей геопотенциала 500 гПа, температуры воздуха на уровне 850 гПа и давления на уровне моря по архиву реанализов США. По интервалу авторских испытаний декабрь 1996 – август 1998 гг. с интегрированием через каждые 10 суток на 35 суток от трех последовательных дат для ансамбля прогнозов рассчитаны *ранги* девяти *прогностических методик*, представляющие собой число случаев (%), когда в ранжированном ряду средней квадратической ошибки данная методика занимала соответствующее место среди прочих.

Основные выводы для прогноза среднего за 30 суток поля 500 гПа таковы: динамические прогнозы превосходят инерцию во всех случаях, однако, сильно уступают климатическому и статистическому прогнозам. Осреднение по ансамблю со спектральной фильтрацией существенно превосходит простое осреднение, что свидетельствует о зашумлении результатов моделирования составляющими модельного дрейфа на интервалах, превышающих средние сроки. В совокупности регрессионные методики (по базам в 5 и 10 суток) в 85% случаев занимают первое место.

Отсюда вытекает уточнение задачи: по первым 10 суткам гидродинамического моделирования определить наиболее информативную базу регрессии. В работе (Муравьев, Куликова, 2000) дан анализ используемых критериев априорного качества и предложена схема построения временных рядов среднего квадратического отклонения трех последовательных во времени полей геопотенциала 500 гПа и коэффициентов корреляции между температурой воздуха и высотой

геопотенциала 850 гПа по трем 20-градусным широтным зонам, начиная от 25° с.ш. Первый показатель интерпретируется как показатель устойчивости, а последующие – как показатели бароклинической неустойчивости. На основе моделей временных рядов авторегрессии - скользящего среднего (ARMA) с использованием методологии *совершенного гидродинамического прогноза* были построены стохастические модели показателей устойчивости.

Выводы таковы. Значительная доля априорной информации на интервале до 10 суток содержится в среднем квадратическом разбросе между последовательными полями геопотенциала за предыдущий период. Среди индексов бароклинической неустойчивости наиболее информативным оказался параметр, характеризующий циркуляционные особенности в широтах 25-45°. Это подтверждается известным фактом, что в зимний период максимумы синоптической изменчивости значений высоты 500 гПа расположены над океанами вдоль северной широты 45° (*шторм-треки*).

Глава 4. ДОЛГОСРОЧНЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ: ПРАКТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ

В разделе 4.1 оцениваются потенциальные возможности модели класса T41L15 на интервалах увеличенной заблаговременности в рамках схемы комплексного гидродинамико - статистического ДМП. Схема прогноза представлена в виде технологической линии, состоящей из следующих блоков:

Вычислительный блок. Включает в себя *подготовку начальных данных по базам объективного анализа, архивам глобальных и станционных наблюдений, источникам локальных и глобальных сетей; численное интегрирование МОЦА от смежных сроков наблюдений; постпроцессинг, фильтрацию полей и регрессионное восстановление полей в регулярных точках и по станциям наземных наблюдений.*

Экспертный блок. Включает в себя *априорную оценку качества гидродинамического прогноза на интервале до 10 суток с помощью индексов циркуляции, расхождения траекторий и спектрального волнового анализа; сюда же включается блок принятия решения по выбору информативной прогностической методики (гидродинамика, статистическая интерпретация, инерция, климат, отказ).*

Блок выходной продукции. Состоит из *подготовки выходной продукции (цифровые поля в регулярной сетке, станционные данные, визуализация и информационное сопровождение); оценки качества предыдущего прогноза; обновления архивов и документирование результатов.*

Представлены оценки потенциала модели и статистической надстройки по следующим подразделам: *идентификация режимов* циркуляции; *качество экспертизы* информативности гидродинамического прогноза и выбора прогностической методики; множественная регрессия при *регионализации* прогноза в координатах станций (*downscaling*). Приводятся результаты авторских испытаний схемы. Подробно рассмотрена конкретная синоптическая ситуация (ноябрь – декабрь 1996 г.) и проведена оценка успешности прогноза в условиях *резких перестроек (case study)*.

Проанализированы ситуации *возврата качества*, когда по какому-либо показателю наблюдается рост качества за пределами срока динамической предсказуемости. Прогноз *режимов атмосферной* циркуляции проведен по индексам циркуляции Уоллеса-Гацлера. Сопоставлены априорные и апостериорные оценки качества прогноза.

В результате получены следующие выводы: 1) потенциал модели класса T41L15 вполне удовлетворителен для прогноза на сроки, превышающие средние; 2) чисто динамические прогнозы требуют статистического постпроцессинга; 3) проблематику ДМП следует формулировать в терминах адаптивного, *режимо-ориентированного* подхода с использованием ансамблей прогнозов и априорного оценивания качества гидродинамического моделирования.

В разделе 4.2 рассмотрены ансамбли прогностических методик по интервалу оперативных испытаний предложенной схемы месячного прогноза (начальные данные за март 1999 – июнь 2000). Приводятся результаты оценок качества прогнозов осредненных полей за 10, 20 и 30 суток.

Для методики априорного оценивания качества использована процедура дискриминантного анализа, позволяющая сделать выбор методики информативного прогноза. В качестве предиктора качества использована величина аномалии CKO_t геопотенциала 500 гПа по предшествующим начальной дате тройкам полей:

$$CKO_t = \frac{1}{3} [CKO(H_{t-1}, H_t) + CKO(H_{t-1}, H_{t+1}) + CKO(H_t, H_{t+1})]$$

Методика прогноза с помощью временных рядов типа ARMA среднего для поля, среднего за 7-8-9 прогностические сутки, на основе концепции *PerfectProg* позволяет оценить предполагаемое качество прогноза полей, осредненных за 20,30 суток. Приводится пример линейного дискриминантного анализа для априорного оценивания и выбора соответствующей методики при прогнозе среднего за 20 суток поля геопотенциала 500 гПа. Формулируется соответствующее решающее правило.

В разделе 4.3 описаны эксперименты по оценке роли *внешних факторов* (в первую очередь АТПО) в формировании и эволюции

крупномасштабных аномалий атмосферной циркуляции. Особое внимание уделено месячному интервалу прогноза. В разделе приводятся результаты численных экспериментов, направленных на решение следующих проблем: 1) оценка роли океана в формировании крупномасштабных аномалий атмосферной циркуляции и 2) учет модельного дрейфа на интервалах удлинённых сроков прогноза.

Первая серия экспериментов была проведена для выяснения детальной структуры отклика атмосферной циркуляции на *суточный* форсинг АТПО. Известно, что в изменчивости циркуляции средней тропосферы на интервале до месяца роль океана считается незначительной. В полях разностей «аномального» (суточный климат) и «контрольного» (месячный климат) экспериментов через две недели начинают нарастать *крупномасштабные* аномалии атмосферной циркуляции. На *диаграммах Хофмеллера* видны порождения циркумполярного вихря, возмущений масштаба волн Россби и блокирующей ситуации. Это может интерпретироваться как влияние синоптических масштабов ТПО на глобальные особенности ОЦА.

Вторая серия экспериментов проведена для выделения влияния внешних факторов с помощью *вейвлет-фильтров*, позволяющих оценивать особенности нестационарных процессов. Показано, что влияние АТПО начинает сказываться за пределами среднего срока. Такой же фильтр дает оценку срока наступления модельного дрейфа.

Третья серия экспериментов имела целью определение типичных пространственно – временных масштабов с использованием *ансамблей* прогнозов. Была разработана система *вероятностных оценок* изменчивости атмосферной циркуляции, наблюдаемой в прогностических ансамблях. Среди характеристик наиболее важными представляются *относительное мастерство* (Relative Operating Characteristics, ROC), *критерий Брайера* для бинарных случайных величин, оценки по *диаграммам Талаграна*, характеристики *экономической полезности*. По кривой ROC определяется качество прогнозирования крупномасштабных аномалий, интерпретируемых как *события* (*явления, режимы*). Ансамбль данных формировался из 10 членов при моделировании метеорологических полей на 140 суток со стартом в сроки, отстоящие на 12 часов (срок отсечения 27 декабря 2002 г.). Полные ансамбли (30 членов) формировались с помощью полей ТПО: 1) фактические АТПО за предыдущие 10 суток с экстраполяцией на весь интервал интегрирования; 2) климатические АТПО и 3) аномалии ТПО с линейной релаксацией к климату в течение января. В качестве *явления* рассматривались положительные аномалии высоты геопотенциала 500 гПа над европейской территорией. Эти аномалии отражали условия

антициклонической активности в данный период времени над выделенной территорией. Показано, что для всех полей ТПО качество прогнозирования крупномасштабной аномалии по кривой ROC оказалось в среднем вполне удовлетворительным на интервале до полутора-двух месяцев.

На основе таблиц сопряженности построены *оценки экономической эффективности*, которые использованы для выбора той или иной методики расчета. Показано, что использование климатических ТПО дает следующую эффективность гидродинамического прогноза антициклонической циркуляции над Европейской территорией: затрачивая, скажем, 100 единиц стоимости при доверии к прогнозу можно избежать 500 единиц потерь при отсутствии доверия к прогнозу и при одновременном наступлении данного явления.

Само качество ансамблей оценивается с помощью *диаграмм Талаграна* (*rank diagrams*). В предположении совершенного прогноза с помощью этих диаграмм можно оценивать вклад того или иного форсинга в качество ДМП. По результатам моделирования оказалось, что на средних сроках (до 10 суток) удовлетворительное качество прогноза антициклонической активности обеспечивается климатическим полем ТПО, в то время, как интерполяция АТПО на период прогноза приводит к сильному переучету антициклонической аномалии на среднем сроке прогноза.

По всему интервалу прогноза климатический форсинг приводит к сильному переучету аномалий, в то время как экстраполяция АТПО заметно выравнивает диаграмму. Таким образом, построение ансамблей с лаговыми начальными данными должно сопровождаться учетом реальной (или близкой к реальной) АТПО для получения удовлетворительного прогноза аномалий над Европейской территорией. Это дает оценку применимости климатических полей температуры поверхности океана в практике ДМП с использованием моделей указанного класса.

В разделе 4.4 проведен анализ систематических ошибок на основных прогностических интервалах. Такие эксперименты стали возможными благодаря глобальным реанализам NCEP/NCAR и вычислительным средствам. Эксперименты проведены по ряду наблюдений 1983-2002 гг. и состоят из (1) десяти лаговых интегрирований на 120 суток с выравниванием сроков начальных данных на конец последнего месяца предшествующего сезона и (2) прогнозов на 35 суток с выравниванием сроков начальных данных на конец каждого месяца.

Первый эксперимент проводился для предварительного сравнения гидродинамических моделей ОЦА, используемых в плане НИР Росгидромета с участием ИВМ РАН, ГГО им. А.И. Воейкова и Гидрометцентра России. Второй эксперимент был проведен для включения поправок на систематическую ошибку в схему оперативного гидродинамико-

статистического месячного прогноза. Рассчитаны и проанализированы меридиональные сечения и географические распределения важнейших элементов: ветра, температуры воздуха, геопотенциала.

Показано, что по летнему сезону Северного полушария общая структура зонального и меридионального ветра воспроизводится вполне удовлетворительно вплоть до уровня 300 гПа, включая струйные течения и разделение струйного течения зимнего полушария на тропическую и полярную ветви. Однако ось тропического струйного течения в модели оказалась сдвинутой к полюсу, как и ось слабого течения в летнем полушарии. Основными причинами ошибок следует признать как недостатки в блоках радиационных параметризаций, так и наличие слишком низкого «потолка» модели (около 10 гПа). Важный вывод заключается в том, что очаги ошибок начинают формироваться, примерно, после первых 10 суток интегрирования. В структуре меридионального ветра модель удовлетворительно воспроизводит ячейку Гадлея, основные очаги ошибок сосредоточены на высотах 200-100 гПа. Основные ошибки в зональной структуре температуры воздуха сосредоточены в приполярных областях и том же высотном слое 200-100 гПа. Систематические отклонения в высоких широтах обусловлены в основном неудовлетворительной параметризацией полярных льдов.

Более детальное исследование ошибок модели проведено на осредненных картах метеорологических полей. Проанализированы поле температуры на высоте 850 гПа (Т850) и поле геопотенциала 500 гПа (Н500). Стандартный набор ошибок в моделях данного класса (*обзор ВМО 1991 г.*) присутствует и здесь: выхолаживание в широкой полосе от 50° ю.п. и 75° с.п. в летний сезон СП, занижение высоты геопотенциала в тропической и субтропической зонах, нарастание ошибок в приполярных областях и в районах основных горных массивов (Тибет, Скалистые горы и Анды).

Проблема учета систематических ошибок формулируется отдельно для *стационарной* и *нестационарной* компонент. Наиболее полным образом такой учет может быть проведен с помощью модели эволюции ошибки. Стационарная ошибка для летнего сезона описана в терминах среднего квадратического отклонения для средних за 5 - 10 - 20 - 30 - 92 суток полей Т850 и Н500. Наибольшее улучшение качества при учете систематической ошибки наблюдается в средних сезонных полях.

Для месячного осреднения получены соответствующие оценки по всему году и выделена сезонная составляющая для *средней абсолютной ошибки* (САО), *среднего квадратического отклонения* (СКО) и *градиентной ошибки* (ГО). По критерию СКО максимальная ошибка в прогнозе Н500 для первого естественного синоптического региона наблюдается в зимний период, в

прогнозе Т850 – в весенний. При этом наибольшее улучшение качества наблюдается в летний период. Критерий ГО свидетельствует о качестве воспроизведения пространственных структур. По данному критерию качество минимально для Н500 и Т850 в летний период, наибольшее улучшение качества также приходится на лето.

Для более точного анализа структуры полей ошибок использованы спектральное разложение и ЕОФ - анализ. Как оказалось, структура полей ошибок Н500 хорошо воспроизводится треугольным усечением Т8. Разложение по ЕОФ проводилось на средних пятисуточных полях. Это позволило ранжировать следующие основные процессы, формирующие ошибки гидродинамического моделирования в летний период: 1) процессы в тропиках, 2) процессы в приполярных широтах, 3) процессы в районах шторм-треков. На примере полей Н500 даны предварительные оценки характеристик межгодового изменения ошибок с помощью полиномиальной аппроксимации для спектральных коэффициентов разложения по сферическим гармоникам. Как оказалось, чтобы аппроксимировать межгодовое изменение поля ошибок для первых восьми коэффициентов, достаточно полинома степени не выше четвертой.

В разделе 4.5 приводятся характеристики системы прогноза по ансамблям (АП) начальных данных и граничных условий, с помощью возмущений физических характеристик и т.д. При этом ансамбли начальных условий применимы, в основном, в *среднесрочных* (иногда *месячных*) интервалах прогноза. Ансамбли по наборам граничных условий используются в *долгосрочных* прогнозах, в которых наиболее важен учет неадиабатических факторов.

Приводится простая формула генерирования АП с помощью векторного уравнения неавтономной динамической системы, зависящей от параметров. Рассматривается проблема обработки большого объема выходной продукции АП. Способов представления информации довольно много: *средние поля* и поля *внутриансамблевой изменчивости*, *дымовые шлейфы*, *ранговые статистики* по процентилям и выбросам, *диаграммы Талагранна*, *спагетти*, *стампы* и полные карты распределения вероятностей.

Одной из важнейших особенностей АП является возможность выделения режимов атмосферной циркуляции и воспроизведение сценариев развития процессов (в том числе, экстремальных).

Для периода января-июля 2002 г. проведены оценки качества воспроизведения крупномасштабных структур на интервале среднего срока – до 10 суток. Количество прогнозов составляет 45. Именно первые 10 суток гидродинамического прогноза используются в оперативной схеме для априорного оценивания качества. Очаги высокого значения стандартного

отклонения внутри ансамбля за эти 10 суток (всего 50 полей) можно использовать как индикатор неустойчивости развивающегося процесса, неудовлетворительного качества моделирования или же и того и другого одновременно. По полям высот 500 гПа, температуры на 850 гПа и давления на уровне моря получены основные характеристики гидродинамического прогноза. Наибольшие очаги ансамблевой изменчивости H500 растягиваются в широтном направлении по Тихоокеанскому и Атлантическому шторм-трекам Северного полушария. Среднее поле давления по всему интервалу прогнозов удовлетворительно воспроизводит основные центры действия: антициклоны в субтропиках и циклоны в северных широтах.

Анализ по холодному и теплomu периодам отдельно приводит к следующим выводам: экстремальные значения изменчивости поля H500 в холодный период примерно вдвое превышают изменчивость теплого периода, при этом очаги изменчивости перемещаются с океанов, на которых они локализованы в холодный сезон, на территорию Евразии в теплый сезон.

Сценарий развития крупномасштабных процессов прослежен на примере прогноза отсеченного антициклона в 3-м естественном синоптическом регионе, сформировавшегося в первой декаде марта 2002 года. Приводятся примеры представления с помощью *стампов*. Демонстрируются недостатки стандартного осреднения по ансамблю, при котором утрачивается существенная информация о развитии крупномасштабного процесса блокирования. Анализ характерных изогипс по *спазетти* некоторых значений (536-540-544-548-552 дам) позволяет выделить *один* из вариантов прогноза, наиболее близко воспроизводящий конфигурацию отсечения. Отсюда следует, что простое осреднение по ансамблю способно привести к полной утере информации о развитии циркуляционного режима, в то же время устойчивая *оценка вероятности* развивающегося процесса возможна при намного большем объеме прогностического ансамбля.

В данном разделе представлены также некоторые результаты анализа статистики ROC в сочетании с характеристикой качества по средней квадратической ошибке, нормированной на СКО инерционного прогноза (RMSSS). Даны оценки размаха переменной ROC с помощью долей точных попаданий и ложных тревог, выявлена связь этой статистики с показателем надежности *Багрова* и критерием качества *Пирси-Обухова*. Статистики ROC и RMSSS использованы в оценке качества прогноза крупномасштабных аномалий над Европейской территорией в интервалах 1-10 суток и 5 – 13 суток. Показано, что модель данного класса по критерию ROC более надежно воспроизводит фазу *больше нормы*.

В разделе 4.6 приводятся результаты эксплуатации оперативной

гидродинамико-статистической схемы ансамблевого метеорологического прогноза полей Северного полушария и приземной температуры воздуха по станциям СНГ. На сайте Гидрометцентра (meteoinfo.ru) регулярно размещается информация о результатах месячного прогноза полей Северного полушария.

Выходная продукция дополняется полями стандартного отклонения значений в точках сетки от среднего по ансамблю для *первых 10 суток*. Таким образом, поставляется информация двух типов, с помощью которых можно сделать выводы относительно возможного сценария развития синоптических ситуаций, или режимов, на интервалах 10 – 30 суток.

Во-первых, оценивается состоятельность средних значений. Если прогноз не первую декаду верен, то большой разброс величин внутри ансамбля свидетельствует о том, что среднее значение нельзя считать представительным ввиду возможной смены циркуляционных режимов. Для обоснованных выводов требуется синоптический анализ модельных полей в суточной дискретности на интервале первых 10 суток.

Во-вторых, данная информация по первой прогностической декаде дает априорную оценку качества гидродинамического прогноза на месяц вперед. Разброс траекторий свидетельствует, как правило, либо о развитии неустойчивой ситуации, либо о неудовлетворительном качестве самого гидродинамического прогноза.

Приводятся примеры продукции, размещаемой в Интернете, и включающей в себя как поля, так и информационное сопровождение (резюме), составляемое синоптиком.

Приводятся результаты *интерпретации* гидродинамических данных для прогноза приземной температуры воздуха на станциях по периоду декабрь 1999 – март 2002 гг.: качество, оцененное по ρ , составляет 76, 75 и 74% совпадения точек с одинаковыми знаками аномалий при выборе базы регрессии в 10 суток (рис.5).

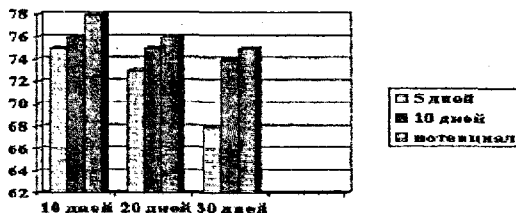


Рис. 5. Качество прогноза средних за 10, 20, 30 дней значений приземной температуры воздуха по показателю ρ (%) для 70 станций бывшего СССР за период прогноза декабрь 1999 – март 2002 гг. Левый столбец - база 5 суток, средний – 10 суток, правый - максимальное значение ρ при апостериорном выборе наилучшего прогноза.

В **Заключении** перечисляются главные результаты представленной работы. Формулируются рекомендации, важные для увеличения информативности долгосрочных метеорологических прогнозов при режимо-ориентированном подходе.

Принципиальная концепция заключается в том, что основной объект ДМП - циркуляционные режимы, определенные в своих статистических характеристиках. Это могут быть средние частоты, продолжительность, интенсивность, вероятности переходов. В связи с этим должны применяться соответствующие статистические надстройки и подходящие процедуры верификации.

Для получения информативного прогноза на увеличенных сроках необходимо: использование наиболее полных МОЦА; использование ансамблей прогнозов для вероятностных оценок; априорное оценивание по интегральным характеристикам циркуляционных режимов; учет синоптического диапазона изменчивости; коррекция стационарных и нестационарных ошибок МОЦА, и тем самым учет междугодовых изменений; использование *смесей методик* - гидродинамики, статистики и синоптики.

Публикации по теме диссертации

1. *Муравьев А.В.* Оценка статистических характеристик эргодического процесса на примере скалярной скорости ветра // Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1984, вып.117, с.40-67.
2. *Муравьев А.В.* Оценки степени сходства (различия) выборок многомерных метеорологических наблюдений // Труды Гидрометцентра СССР, 1987, вып.294, с.76-84.
3. *Муравьев А.В.* Оценки сходства (различия) метеорологических объектов и их применение в задачах прогноза погоды. Дисс. канд. физ.-мат. наук. НТБ Гидрометцентра РФ, 1990а, 270 с.
4. *Муравьев А.В.* Статистические свойства доли пересечения двух выборок // Труды Гидрометцентра СССР, 1990б, вып.306, с.72-79.
5. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Семенюк Е.А., Бардин М.Ю., Муравьев А.В., Нестерова Г.А., Савелова О.Ф., Хамидулина А.Б.* Схема вероятностного адаптивного метеорологического прогноза (групповые аналоги) с оптимизацией состава предикторов // Труды Гидрометцентра СССР, 1990в, вып.306, с.3 - 55.
6. *Муравьев А. В.* Вычислительный эксперимент по расчету спектральной плотности на основе модели авторегрессионного процесса // Метеорология и гидрология, 1992а, № 12, с.63-70.
7. *Муравьев А.В.* Простые и ранговые корреляции показателей сходства/различия метеорологических показателей // В сб. «Мониторинг и вероятностный прогноз климата», СПб.: Гидрометеиздат, 1992б, с. 72-83.

8. *Муравьев А.В.* Статистический анализ показателей сходства (различия) и оценки предсказуемости полей температуры в Северном полушарии // В сб. «Мониторинг и вероятностный прогноз климата». СПб.: Гидрометеоиздат, 1992в, с.56-72.
9. *Муравьев А.В.* Эквивалентные фильтры и их использование в анализе модельных данных // Метеорология и гидрология, 1993а, №11, с. 16-21.
10. *Тросников И.В., Муравьев А.В.* Возможности статистической фильтрации трендов в моделях общей циркуляции атмосферы // Метеорология и гидрология, 1993б, № 11, 22-31.
11. *Муравьев А.В.* Визуализация модельных данных с помощью корреляционных характеристик аттрактора // Метеорология и гидрология, 1994а, № 3, с. 10-19.
12. *Муравьев А.В.* Группирование показателей сходства (различия) метеорологических объектов // Метеорология и гидрология, 1994б, № 9, с. 39-47.
13. *Тросников И.В., Муравьев А.В.* Апостериорная фильтрация трендов в моделях общей циркуляции атмосферы // Проблемы долгосрочного прогноза и короткопериодных колебаний климата. Информационный сборник. С.-Пб., Гидрометеоиздат, 1995а, с.74-81.
14. *Муравьев А.В.* Моделирование отклика атмосферной циркуляции на стационарные аномалии температуры поверхности океана // Метеорологи и гидрология, 1995б, № 7, с. 5-14.
15. *Муравьев А.В., Киктев Д.В.* Эмпирическая устойчивость модельных режимов и предсказуемость циркуляционных процессов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 1995в, т. 31, № 4, с. 488-495.
16. *Муравьев А. В.* Статистическая структура преобразованных рядов наблюдений // Тр. Гидрометцентра РФ, 1996а, вып. 329, с. 108-118.
17. *Муравьев А.В.* Выделение интервалов климатической однородности с помощью евклидовой метрики // Тр. Гидрометцентра РФ, 1996б, вып. 329, с.119-128.
18. *Муравьев А.В.* Типы преобразований многомерного ряда наблюдений // Тр. Гидрометцентра РФ, 1996в, вып. 329, с. 102-107.
19. *Muravev A., Kruglova E., Kulikova I., Kaznacheeva V.* Hydrodynamical modeling of long-range anomalies of atmospheric circulation using multi-model approach // Proc. of WMO International Workshop on DERF (Toulouse, 17-21 Nov. 1997). 1998, WMO/TD- 881, 34-38.
20. *Муравьев А.В., Куликова И.А.* Сопряженность типов атмосферной циркуляции в средней тропосфере Северного полушария // Метеорология и гидрология, 1998а, № 12, с. 23-33.
21. *Круглова Е.Н., Муравьев А.В.* Реализация на персональных компьютерах мультимодельного подхода к проблеме долгосрочного прогноза // Метеорология и гидрология, 1998б, 1, с.36 - 45.
22. *Куликова И.А., Муравьев А.В.* Факторный анализ региональной циркуляции // Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 1998в, т.34, No 3, с.306 - 316.
23. *Филатов А.Н., Муравьев А.В., Реснянский Ю.Д.* Долгосрочный метеорологический прогноз: математические проблемы и возможности гидродинамических моделей // В кн. Семьдесят лет Гидрометцентру России, С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 1999а, 141-165.

24. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. I. Основные конструктивные и технические характеристики динамико-статистической схемы долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология, 1999б, № 3, с. 28-36.
25. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. Часть 2. Условия эксперимента и результаты прогноза // Метеорология и гидрология, 1999в, № 4, с. 5-15.
26. Муравьев А.В. Использование линейных статистических методов для анализа нелинейных крупномасштабных атмосферных процессов // Тезисы докладов Международной конференции Интеллектуализация Обработки Информации, 12-16 июня 2000а, Симферополь, 113-114.
27. Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Казначеева В.Д. Технология экспериментальных долгосрочных метеорологических прогнозов динамико – статистическими методами // Труды Гидрометцентра России, вып.334, 2000б, 107-121.
28. Муравьев А.В. Геометрия изогипс и устойчивость форм циркуляции // Тр. Гидрометцентра РФ, 2000в, вып. 333, с. 61-73.
29. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология, 2000г, № 12, с. 24-34.
30. Муравьев А.В., Куликова И.А. Устойчивость атмосферных процессов и априорная оценка качества гидродинамических прогнозов // Метеорология и гидрология, 2000д, № 9, с. 6-19.
31. Муравьев А.В., Куликова И.А. Экспертная оценка устойчивости атмосферных процессов для долгосрочного метеорологического прогноза // Национальная академия наук Украины, Институт проблем искусственного интеллекта, 2000е, с. 407- 410.
32. Muravev A. Making the best use of the ensemble long-range forecast products // Commission for basic systems, OPAG on data processing and forecasting systems. Proceedings of Workshop on use of ensemble prediction systems (Beijing, 16-20 October 2000). WMO/TD No.1065, p.21.
33. Muravev A. Hydrodynamic-statistical long-range prediction scheme: practical stability and predictability study // The first APEC Climate Network Working Group Meeting, 17-18 May 2001, Seoul, Republic of Korea, 91-105.
34. Boundel A., Muravev A. The role of different scales of processes in precipitation modeling // Geophysical research abstracts, 6th General Assembly of European Geophysical Society, GRA3, 2001, vol.3, 2001, 3956
35. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Бундель А.Ю. Комплексный гидродинамико-статистический прогноз средних 10-, 20- и 30-суточных полей высоты изобарических поверхностей 500, 850 и 1000 гПа, приземного давления в узлах сетки по Северному полушарию и приземной температуры воздуха по станциям России и СНГ // Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Информационный сборник № 29, 2002, с. 17-35.

36. *Bundel A., Kruglova E., Kulikova I., Muravev A.* Large-scale circulation patterns, instability factors and global precipitation modeling as influenced by external forcing // *Geophysical research abstracts, 7th Gen. Assembly of European Geoph. Soc., 2003, 5, p. 00533.9.*
37. *Муравьев А.В., Куликова И.А.* Оценка экономической эффективности ансамблей гидродинамических прогнозов на основе вероятностных оценок качества // *Метеорология и гидрология, 2004а, № 11, с.17-26.*
38. *Муравьев А.В., Куликова И.А., Круглова Е.Н., Бундель А.Ю.* Анализ вынужденной изменчивости атмосферы с помощью вейвлет - фильтрации модельных данных // В сб. «*Фундаментальные и прикладные гидрометеорологические исследования*». Труды Гидрометцентра России, 2004б, с.24-36.
39. *Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Казначеева В.Д.* Опыт использования ансамблей в гидродинамико - статистическом прогнозе метеорологических полей // *Метеорология и гидрология, 2005а, № 7, с. 3-15.*
40. *Муравьев А.В., Куликова И.А.* Использование ансамблей в прогнозе погоды: проблемы, методы и перспективы // *Метеорология и гидрология, 2005б, № 3, с. 5-24.*

Муравьев Анатолий Владимирович

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Подписано в печать 21.02.2006 г. Формат 60х90, 1/16.
Объем 2,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 170

Отпечатано в ООО “Фирма Блок”
107140, г. Москва, ул. Краснопрудная, вл.13. т. 264-30-73
www.blok01centre.narod.ru

Изготовление брошюр, авторефератов, печать и переплет диссертаций.

