МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

80 лет ГИДРОМЕТЦЕНТРУ РОССИИ

Москва
ТРИАДА ЛТД
2010

GIDRO st1-3_kor.indd 1 22.01.2010 12:51:57

УДК 551. 50+556+630+551.46.0 (047)

Редколлегия:

Р.М. Вильфанд (отв. редактор), Н.Ф. Вельтищев (зам. отв. редактора),
С.В. Борщ, А.А. Васильев, Е.С. Нестеров, Ю.Д. Реснянский, Н.П. Шакина,
Н.А. Шестакова, Г.А. Заимских, Е.Н. Круглова

Сборник содержит статьи, освещающие научно-исследовательскую и оперативно-прогностическую деятельность Государственного научного центра Российской Федерации — Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации (Гидрометцентра России) за последнее десятилетие. Рассматриваются состояние и перспективы развития методов и технологий гидрометеорологического прогнозирования, приводятся наиболее важные теоретические и практические результаты, полученные в период 2000—2009 гг. Особое внимание уделено результатам глобального, регионального и мезомасштабного гидродинамического моделирования.

Рассчитан на специалистов научно-исследовательских и оперативно-прогностических организаций Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, других ведомств, преподавателей, аспирантов, студентов соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-86344-214-3

© ГУ «Гидрометцентр России», 2009

Book_Gidromet.indb 2 13.01.2010 13:12:16

Гидрометцентр России в XXI веке

Р.М. Вильфанд, А.А. Васильев, Н.А. Шестакова
Гидрометцентр России

1. Особенности развития

Гидрометцентр России начал свою деятельность 1 января 1930 года в качестве Центрального бюро погоды СССР, образованного в Москве.

Древнегреческий философ Платон писал, что греки дали новый толчок развитию науки благодаря тому, что при проведении исследований освободились от критерия выгоды. Варвары, наоборот, все свои открытия связывали с их практическим применением. Оба мнения до сих пор являются спорными, но одно несомненно: идея образования Гидрометцентра России была продиктована потребностями практики. Однако эти потребности значительно опережали возможности прогнозирования погоды и гидрометеорологических явлений, и возникла острая необходимость проведения научных исследований, ориентированных на создание фундаментальной основы решения практических (прогностических) задач.

В связи с индустриализацией страны, развитием авиации, освоением Северного морского пути, расширением сферы использования водных ресурсов и интенсификацией сельского хозяйства деятельность Центрального бюро погоды расширялась и развивалась. С 1936 г. это уже Центральный институт погоды, с 1943 г. — Центральный институт прогнозов, с 1965 г. — Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР (Гидрометцентр СССР), с 1992 г. и по настоящее время — Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (Гидрометцентр России).

В период Великой Отечественной войны Центральный институт погоды подготавливал прогнозы по районам боевых действий, составлял прогнозы погоды для авиации дальнего действия и воздушно-десантных операций, осуществлял обеспечение наземных операций гидрологическими прогнозами.

Послевоенные годы ознаменовались развитием динамической метеорологии, численных прогнозов и внедрением в службу погоды электронных вычислительных машин. Это существенным образом повлияло как на направление научных исследований, так и на оперативную деятельность. Стали интенсивно развиваться

Book_Gidromet.indb 3 13.01.2010 13:12:17

гидродинамические модели общей циркуляции атмосферы, а не только традиционные синоптические исследования по разработке методов прогноза гидрометеорологических величин и явлений.

В 1965 г. в связи с созданием в системе Всемирной метеорологической организации по поручению Генеральной Ассамблеи ООН трех Мировых метеорологических центров (Москва, Вашингтон, Мельбурн) на Гидрометцентр СССР были возложены функции ММЦ-Москва. Запуск 4 октября 1957 г. в СССР и 2 января 1958 г. в США искусственных спутников Земли ознаменовал начало освоения космоса и использование метеорологических спутников для изучения атмосферы и прогнозирования погоды. Гидрометцентр СССР оказался на переднем крае исследований по спутниковой метеорологии и применения результатов в обеспечении народного хозяйства, что привело к награждению его в 1967 г. орденом Ленина. В период реформ установившаяся система бюджетного финансирования была нарушена, необходимо было найти новые способы решения задач. Гидрометцентр России и с этой трудностью справился, используя новые возможности и концентрируя усилия на основных направлениях развития. Важным событием, во многом определившим судьбу научных исследований в этот период, было присвоение Постановлением Правительства Российской Федерации от 14 октября 1994 г. Гидрометцентру России статуса Государственного научного центра Российской Федерации на основе проведения специального конкурса. Отрадно отметить, что этот статус Гидрометцентр имеет до сих пор, периодически его подтверждая на той же конкурсной основе.

Ученые Гидрометцентра России на протяжении всей истории его существования вносили весомый вклад в развитие гидрометеорологии, особенно прогностической. Мы не будем перечислять все их имена, они широко известны. В стенах Гидрометцентра России работали академики Г.И. Марчук и А.С. Монин, члены-корреспонденты Академии наук И.А. Кибель и Е.Н. Блинова, профессора А.Ф. Дюбюк, Н.И. Булеев, В.А. Бугаев, А.Л. Кац, П.С. Линейкин, С.Т. Пагава, М.А. Петросянц, Х.П. Погосян, И.Г. Пчелко, К.А. Семендяев, Е.С. Уланова, Б.Д. Успенский, С.П. Хромов и многие другие. Ученые Гидрометцентра стали основоположниками признанных научных школ по численным прогнозам погоды, авиационной метеорологии, гидрологическим прогнозам, морским гидрологическим прогнозам, агрометеорологическим прогнозам. Благодаря их самоотверженному труду Гидрометцентр России в настоящее время представляет собой

Book_Gidromet.indb 4 13.01.2010 13:12:17

ведущее научно-исследовательское учреждение Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Следует отметить, что интеграция в одном учреждении научной и оперативной работы является основной особенностью Гидрометцентра России по сравнению со многими зарубежными метеорологическими центрами. Эта особенность сохранилась, поскольку и теперь требования практики опережают возможности науки. Благодаря этой особенности проблема внедрения в практику результатов научных исследований в сфере прогнозирования погоды решается оптимальным образом, да и проводимые исследования с самого своего начала нацелены на решение практических задач.

Хотя такая организационная структура является оптимальной, много раз приходилось прилагать усилия руководству Гидрометцентра России, чтобы ее сохранить, и каждый раз решающим аргументом служила не только эффективность работы учреждения в целом, но и эффективность внедрения в практику полученных научных результатов.

Вторая особенность — интеграция прогностической деятельности, касающейся всей гидрометеорологии в целом, а именно, метеорологических прогнозов любой заблаговременности, гидрологических, агрометеорологических прогнозов, а также прогнозов для авиации, для морской деятельности и других отраслей экономики. Необходимость такой интеграции первоначально диктовалась требованиями централизованного обслуживания народного хозяйства, но оказалось, что она имеет и объективную составляющую, которая становилась все более заметной со временем. Известно, что при составлении любого вида прогноза гидрометеорологического характера используются прогностические значения различных метеорологических величин. Гидрологические прогнозы используют величину температуры и количество осадков, агрометеорологические прогнозы также зависят от того, какая будет погода и т.д. Ранее при отсутствии методик прогнозирования этих величин для составления гидрометеорологических прогнозов брались их климатические характеристики. Но по мере совершенствования прогностических методик, увеличения точности метеорологических прогнозов все чаще и чаще стали пользоваться не фактическими и климатическими значениями требуемых величин, а их прогностическими значениями. Иными словами, прогресс в развитии методик метеорологических прогнозов способствует прогрессу и развитию всего комплекса прогностической гидрометеорологии, а наличие этого комплекса в одном и том же учреждении сокращает путь внедрения их в оперативную практику.

Book_Gidromet.indb 5 13.01.2010 13:12:17

Третья особенность — наличие системы подготовки кадров высшей квалификации. При Гидрометцентре России имеется аспирантура и Диссертационный совет по защите докторских и кандидатских диссертаций по двум научным специальностям: «Физика атмосферы и гидросферы» и «Метеорология, климатология, агрометеорология». Современные технологические линии гидрометеорологического прогнозирования очень сложны и уникальны: их нельзя купить на рынке — их нужно создать. Поддержание их непрерывного функционирования и, тем более, их развитие требуют специальной подготовки кадров высшей квалификации.

80 лет — почтенный возраст не только для человека, но и для учреждения, и с удовлетворением можно отметить, что в течение всех этих лет, даже самых трудных для страны, Гидрометцентр России с честью выполнял возложенные на него функции, постоянно совершенствуя свою структуру и сохраняя рациональные идеи, заложенные его основателями.

2. Особенности современного этапа прогностической метеорологии

К началу XXI столетия мировое метеорологическое сообщество достигло выдающихся успехов в краткосрочном и среднесрочном прогнозировании погоды. К таким успехам относятся:

– разработка в ряде стран глобальных, региональных и мезомасштабных гидродинамических численных моделей общей циркуляции атмосферы. Эти модели позволяют прогнозировать поля метеорологических элементов на 5—7 суток с приемлемой для многих потребителей точностью;

– создание в крупных метеорологических центрах, оснащенных мощной вычислительной техникой, уникальных технологий, позволяющих внедрить эти модели в оперативную практику;

– создание и организация непрерывного функционирования глобальных международных систем наблюдений, телесвязи и обработки данных, позволяющих осуществлять наблюдение за погодой, передачу данных наблюдений в метеорологические центры и распространение продукции в прогностические центры национальных метеорологических служб.

Успехи в численном (гидродинамическом) моделировании атмосферы привели к существенному изменению в технологии подготовки прогноза погоды. Крупные метеорологические центры,

Book_Gidromet.indb 6 13.01.2010 13:12:18

оснащенные мощной вычислительной техникой, ежедневно на основе глобальных моделей общей циркуляции атмосферы производят расчет на 5—7 суток полей давления, высот изобарических поверхностей, полей ветра и температуры и другой продукции и автоматически, в кодированном виде, распространяют ее в оперативные прогностические организации. Иными словами, произошел переход от децентрализованной системы прогнозирования к централизации ее основы — прогноза метеорологических полей.

Такие метеорологические центры, подобно промышленным комбинатам, выпускают продукцию, используемую более мелкими организациями, так же как, к примеру, продукцию металлургического комбината используют для изготовления каких-либо изделий на заводах и фабриках. По существу, создана международная «прогностическая индустрия». В нашей стране выполнение функций одного из центров такой индустрии возложено на Гидрометцентр России.

Основная деятельность Гидрометцентра России как государственного учреждения связана с выполнением задач федерального значения:

– обеспечением национальной безопасности страны в области гидрометеорологии;

– выполнением международных обязательств Российской Федерации как члена Всемирной метеорологической организации.

Главной уставной задачей Гидрометцентра России является получение новых научных знаний о гидрометеорологических явлениях и процессах в атмосфере, океане, верхнем слое суши, создание и усовершенствование методов, моделей и технологий их прогнозирования в целях снижения риска жизни населения, уменьшения ущерба от опасных и стихийных погодных явлений, информирования руководства страны о фактическом и ожидаемом состоянии природной среды, гидрометеорологического обеспечения экономики и обороны страны.

Осуществляемые Гидрометцентром России фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы проводятся в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002—2006 гг. и проектов РФФИ, прикладные исследования в рамках ФЦП «Развитие системы гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства Российской Федерации в 1994—1996 годах и на период до 2001 года», «Экология и природные ресурсы» подпрограмма «Гидрометеорологическое обеспечение безопасной жизнедеятельности и рационального

Book_Gidromet.indb 7 13.01.2010 13:12:18

природопользования», «Предотвращение опасных изменений климата и их отрицательных последствий», «Мировой океан», совместной научно-технической программы Союза Беларуси и России «Совершенствование и развитие единой технологии получения, сбора, анализа и прогноза, хранения и распространения гидрометеорологической информации и данных о загрязнении природной среды» и направлены на создание методов, моделей и технологий прогнозирования погоды, в том числе неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений.

3. Важнейшие теоретические и практические результаты последнего десятилетия

3.1. 2000 —2001 гг.

Создана первая в России глобальная 31-уровневая модель высокого пространственного разрешения с шагом по горизонтальным координатам 1,4°, предназначенная для выпуска прогнозов погоды с заблаговременностью до 5 суток.

Впервые в нашей стране предложен и апробирован алгоритм нелинейной инициализации по нормальным модам с учетом действия неадиабатических источников тепла.

Предложена и апробирована в спектральной модели атмосферы новая схема мелкой конвекции, основанная на использовании лагранжева подхода.

Создана адаптивная статистическая модель среднесрочного прогноза основных метеорологических элементов для 5000 пунктов на всех континентах земного шара.

Получены новые сведения о закономерностях долгопериодной изменчивости системы «*атмосфера — океан — Земля*», получены оценки влияния сезонной предсказуемости режимов атмосферной циркуляции, разработаны новые методы прогнозирования внутримесячных изменений температуры воздуха.

Получены количественные зависимости интенсивных осадков, сплошной облачности и сильных ветров от бароклинности и циклоничности атмосферных процессов, что чрезвычайно актуально для повышения точности их прогнозирования.

Разработана методика расчета статистических оценок максимально возможных суточных осадков применительно к территориям речных водосборов.

Book_Gidromet.indb 8 13.01.2010 13:12:19

Усовершенствована региональная модель прогноза на срок до 48 часов на сетке 137х209 по горизонтали с разрешением 75 км путем создания и включения в нее блоков параметризации радиации и пограничного слоя атмосферы.

Разработан метод учета тропических циклонов в региональной модели, проведена апробация метода на реальных данных.

Разработаны численные алгоритмы решения исходного уравнения притока тепла и уравнения для давления в негидростатических моделях (упругая аппроксимация).

На основе выходных данных региональной модели с разрешением 75 км проведены численные эксперименты по моделированию возникновения и развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями.

Впервые в России на суперкомпьютере CRAY У-MP8E создана глобальная система усвоения данных наблюдений о состоянии атмосферы, позволяющая получать в оперативном режиме поля метеорологических характеристик в узлах регулярной широтно-долготной сетки 2,5х2,5. Для функционирования этой системы не требуется привлечения прогностической информации зарубежных метеорологических центров.

Создана региональная система усвоения данных и наблюдений о состоянии атмосферы, включающая схему объективного анализа метеорологических элементов и полулагранжеву прогностическую модель атмосферы.

На суперкомпьютере CRAY У-MP8E реализован глобальный объективный анализ влажности в свободной атмосфере и глобальный объективный анализ температуры подстилающей поверхности.

На суперкомпьютере CRAY У-MP8E внедрены в оперативную эксплуатацию программные средства второй очереди автоматизированной системы оперативной обработки информации (АСООИ-CRAY). В опытную эксплуатацию внедрены программные средства первой очереди технологии круглосуточного приема от ЦКС «Москва» и раскодирования ежедневных данных наблюдений для декодирования ежедневных данных наблюдений и продукции зарубежных центров в кодовой форме ОК1В. Внедрены подсистема комплексного мониторинга потоков данных и автоматизированная технология оценки успешности прогнозов опасных явлений погоды и полей метеоэлементов. Разработана и реализована первая очередь подсистемы для информационного обеспечения потребителей продукции Гидрометцентра России с использованием технологии Интернет/Интранет.

Book_Gidromet.indb 9 13.01.2010 13:12:19

Получены прогностические рекомендации и количественные выводы о сопряженности засух с урожайностью зерновых культур и циркуляционно-термическими характеристиками атмосферы.

Разработан и апробирован программный модуль прогноза летних осадков и ветра, имеющих градацию опасного явления, на основе выходных данных региональной модели.

Создана технология долгосрочного прогнозирования уровня Каспийского моря. Получен прогноз эволюции уровня Каспия до 2015 года.

Проведены испытания подсистемы мониторинга снежного покрова по территории северного полушария на основе модели описания сезонной эволюции снежного покрова.

Результаты выполнения программ работ Гидрометцентра России:

– развиваются приоритетные направления науки и техники «Фундаментальные исследования (математическое моделирование)», «Экология и рациональное природопользование»;

– сохранено научное и научно-техническое лидерство Гидрометцентра России в стране и за рубежом в области гидрометеорологии как Мирового Метеорологического центра.

3.2. 2003—2005 гг.

В 2003—2005 гг. Гидрометцентром России проведены исследования по развитию нового поколения математических моделей физических процессов в атмосфере, океане, верхнем слое суши и созданию новых информационных технологий, соответствующих современному уровню мировой гидрометеорологической науки по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Экология и рациональное природопользование» и критическим технологиям Российской Федерации «Мониторинг окружающей среды», «Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф», «Компьютерное моделирование» и по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Рациональное природопользование» и критическим технологиям «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы».

2003 г.

Введена в оперативную эксплуатацию глобальная спектральная модель атмосферы T85L31, позволившая создать технологию

Book_Gidromet.indb 10 13.01.2010 13:12:19

выпуска прогностической продукции глобального покрытия с конкурентоспособным уровнем качества (по точности модель занимает 7—9 место среди лучших мировых моделей). Разработана не имеющая аналогов в России глобальная система усвоения данных, получаемых с различных наблюдательных систем (наземная сеть, спутники, воздушные суда, буи и др.). На основе модели T85L31 впервые в стране создана технология прогнозирования элементов погоды (температуры воздуха у земли, количества осадков, облачности) в глобальном масштабе и не имеющая аналогов динамико-статистическая методика и технология прогноза зон повышенной вероятности гололедных явлений для территории России. Созданы и внедрены не имеющие аналогов методика и технология краткосрочного прогноза погоды для пунктов Центрального федерального округа. Создана технология прогноза и оперативной передачи информации о пространственном распределении зон повышенной вероятности гололедных явлений на территории России. Технология получила Почетный Диплом Победителя Всероссийского конкурса на лучший энергоэффективный проект 2003 г.

2004 г.

Разработана система оперативного выпуска и проверки качества гидродинамических прогнозов метеорологических полей и элементов погоды (осадков, приземной температуры, приземного ветра) на сроки 1—10 суток. Создана функционирующая в режиме реального времени глобальная система усвоения данных наблюдений широкого спектра наблюдательных систем с использованием глобальной спектральной модели Гидрометцентра России высокого пространственного разрешения. Разработана технология ансамблевого сезонного прогноза метеорологических полей на основе использования глобальных моделей атмосферы и океана.

2005 г.

Проведены работы по настройке и отладке отдельных модулей глобальной спектральной модели T169L31. Основное внимание было сосредоточено на устойчивости работы динамического блока, а также — на эффектах взаимодействия с подстилающей поверхностью (описание процессов в пограничном слое атмосферы, «климатические» характеристики тепловлажностного состояния поверхности суши, особенности взаимодействия с орографией). В результате, было достигнуто уменьшение скорости роста ошибок во всей толще

Book_Gidromet.indb 11 13.01.2010 13:12:20





атмосферы и увеличен не менее чем на 12 часов (в отдельных реализациях — до 36) период полезного прогноза на различных уровнях по сравнению с существующей оперативной версией модели T85L31.

Создан экономичный вариант спектральной модели атмосферы применительно к возможностям новой вычислительной техники в рамках технической модернизации Мирового Метеорологического центра, функции которого выполняет Гидрометцентр России. Удалось добиться 10-кратного уменьшения времени счета на 32 процессорах за счет распараллеливания расчета по широтным поясам. Создание экономичного варианта спектральной модели позволило сократить время счета существующей версии T169L31 и ускорить внедрение модели T169L31 на имеющейся вычислительной технике. Получены предварительные результаты для новой версии спектральной модели T339L31.

Разработана пилотная версия технологии ансамблевого прогноза на краткие и средние сроки, включающая блоки построения ансамблей по различным стартовым полям, обработки и верификации и визуализации результатов.

Реализована и прошла квазиоперативные испытания полулагранжева модель с переменным разрешением — первая отечественная модель, достигшая горизонтального разрешения в 30 км над всей территорией России.

3.3. 2006—2008 гг.

В 2006—2008 гг. Гидрометцентром России проведены исследования по развитию нового поколения математических моделей физических процессов в атмосфере, океане, верхнем слое суши и созданию новых информационных технологий, соответствующие современному уровню мировой гидрометеорологической науки по приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Рациональное природопользование» и критическим технологиям «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы», «Технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф», «Технологии обеспечения защиты и жизнедеятельности населения и опасных объектов при угрозах террористических проявлений».

Основные результаты, полученные при выполнении Целевой научно-технической программы «Научные исследования и разработки в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды»

Book_Gidromet.indb 12

13.01.2010 13:12:20

Плана НИОКР Росгидромета для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды следующие.

Завершена разработка основных блоков системы трёхмерного вариационного усвоения данных (многоэлементный анализ, усвоение спутниковых наблюдений). Реализована процедура оценки и устранения смещений в наблюдениях, вызванных несовершенством существующих физических моделей и спутникового оборудования.

Реализована версия модели ПЛАВ-ПР с переменным разрешением и пространственной детализацией порядка 20 км по территории России и проведены эксперименты по предварительной настройке этой версии. Внедрена в оперативную практику глобальная версия конечно-разностной полулагранжевой модели с горизонтальным разрешением 0,9 x 0,72° (порядка 70—75 км по территории России) и 28 уровнями по вертикали.

Модернизировано программное обеспечение глобальной спектральной модели атмосферы — разработаны и реализованы алгоритмы распараллеливания вычислений. Достигнуто устойчивое превышение качества прогнозов базовых метеорологических полей в версии модели T169L31 по сравнению с прогнозами оперативной версии T85L31. Подготовлены распараллеленные версии модели T339L31 и T669L31.

Разработана и реализована на комплексе ЭВМ и внедрена в оперативную практику новая усовершенствованная прогностическая технология расчета элементов погоды (РЭП) на базе статистической интерпретации результатов гидродинамических моделей. Прошли оперативные испытания и внедрены методы прогноза экстремальных температур воздуха до 5-ти суток и прогноза декадной температуры воздуха по территории Российской Федерации. Также на базе РЭП разработан и внедрен в оперативную практику метод прогноза аномально холодной погоды с заблаговременностью 48—144 часа, который используется Федеральным штабом по безопасности электроснабжения Российской Федерации в отопительный сезон.

Разработаны программы интерпретации результатов гидродинамических моделей для задач прогноза нижней границы конвективных облаков, высоты нулевой изотермы, турбулентности в ясном небе. Разработанные программы сданы в АСООИ и начата их оперативная эксплуатация.

Разработан статистический метод идентификации неблагоприятных метеорологических условий, способствующих накоплению примесей в нижних слоях атмосферы, на основе данных мезомодели и профилемера МТП-5.

Book_Gidromet.indb 13 13.01.2010 13:12:20

Разработаны методы краткосрочных прогнозов (на 1 сутки) максимальных расходов (уровней) воды дождевых паводков на наиболее паводкоопасных юго-западных притоках Кубани.

Разработан новый метод автоматизированного долгосрочного прогноза притока воды в Горьковское водохранилище в период весеннего половодья, основанный на районировании бассейна водохранилища по условиям формирования весеннего стока.

Создана автоматизированная система оценки успешности прогностических моделей ветрового волнения и проведено сравнение оперативных прогнозов волнения в Северной Атлантике на основе моделей ААНИИ и ГОИН.

Создан усовершенствованный метод прогноза годового хода уровня Каспийского моря, оправдываемость которого превышает оправдываемость старого метода на 6%. Уточнены статистические характеристики составляющих водного баланса и уровня Каспийского моря с учетом данных наблюдений за последние 30 лет.

Подготовлены к изданию «Рекомендации по гидрометеорологическому обеспечению морских отраслей экономики».

Проведена опытная эксплуатация общесистемных и информационных технологий, входящих в регламент Гидрометцентра России как одного из центров ЕСИМО и подготовлена эксплуатационная документация. Проведена закупка и поэтапное внедрение нового аппаратно-программного комплекса для центра ЕСИМО.

Развиты методы и технологии для подготовки и распространения оперативной диагностической и прогностической гидрометеорологической информации по Мировому океану и морям России, среди которых:

– анализ параметров Мирового океана на основе системы усвоения океанографических данных;

– прогноз опасных штормовых условий для 9 морей России с индикацией опасности по максимальной скорости ветра.

Основной научно-технической продукцией Гидрометцентра России являются гидрометеорологические прогнозы, которые предназначены для общего и специализированного обслуживания разных отраслей хозяйственной деятельности, включая транспортный, топливно-энергетический, сельскохозяйственный и оборонный комплексы, а также для гидрометеорологического обеспечения кризисных ситуаций, связанных с техногенными авариями и стихийными явлениями. Созданные на основе проводимых исследований новые суперкомпьютерные технологии гидрометеорологического прогно-

Book_Gidromet.indb 14 13.01.2010 13:12:21

зирования позволяют с большей заблаговременностью составлять предупреждения об опасных гидрометеорологических явлениях по всей территории России, увеличивают заблаговременность численных прогнозов погоды с 3 до 5 суток, многократно увеличивают объем специализированной информации, уменьшают зависимость Росгидромета от прогностической продукции зарубежных метеорологических центров.

Специфической особенностью Гидрометцентра России является то, что основные результаты его научно-исследовательской деятельности представляют собой непатентуемые методы гидрометеорологических прогнозов различной заблаговременности, используемые в оперативно-прогностических подразделениях Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Внедрение новых методов прогноза в оперативно-прогностическую деятельность осуществляется на основании решений Центральной методической комиссии Росгидромета по гидрометеорологическим прогнозам. За период 2000—2008 гг. Гидрометцентром России создано и внедрено в оперативную практику более 90 инновационных продуктов, ориентированных на достижение стратегических национальных приоритетов Российской Федерации.

Важной задачей Гидрометцентра России является подготовка научных кадров в системе Росгидромета. В октябре 2008 г. Гидрометцентром России была проведена Научная школа-семинар «Современные технологии прогнозирования погоды» для молодых ученых и специалистов Беларуси и России, в которой приняло участие более 200 молодых представителей гидрометслужб Беларуси, России, Узбекистана, Украины и российских государственных университетов. Базовой кафедрой для подготовки специалистов в области гидрометеорологии, геофизической гидродинамики, климатологии, численного прогноза погоды является кафедра метеорологии и климатологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

В Гидрометцентре России регулярно стажируются специалисты метеорологических служб стран СНГ в рамках сотрудничества Межгосударственного Совета по гидрометеорологии (МСГ), проходят производственную и дипломную практику студенты-гидрометеорологи ВУЗов и техникумов. Регулярно проводятся различные научные форумы с участием широкого круга специалистов и научно-практические конференции для представителей сетевых оперативно-производственных подразделений гидрометслужбы, в которых принимают активное участие специалисты не только Феде-

Book_Gidromet.indb 15 13.01.2010 13:12:21

ральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, но и специалисты метеорологических служб стран СНГ.

Результаты научных исследований Гидрометцентр России неоднократно успешно представлял на различных выставочных мероприятиях. Гидрометцентр России — постоянный участник и дипломант Международных и Всероссийских выставок, в том числе Международных выставок «ЭКСПО» (с 2000 по 2008 гг.), Международных научно-промышленных форумах «Великие реки» (с 2000 по 2009 гг.) и ряда других.

В 2005 г. на Гидрометцентр России в целях обеспечения подготовки и проведения в г. Москве 26—29 сентября 2006 г. Международной конференции по проблемам гидрометеорологической безопасности было возложено обеспечение деятельности Организационного и Международного программного комитетов. Конференция проводилась в рамках мероприятий по председательству Российской Федерации в «Группе восьми» и была организована Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) с участием заинтересованных органов исполнительной власти Российской Федерации. В работе конференции приняли участие более 590 человек, представители национальных гидрометеорологических служб, гидрометеорологических центров, научных учреждений и организаций, высших учебных заведений из 31 страны. В принятой конференцией Резолюции выражена признательность Росгидромету и Правительству Российской Федерации за отличную организацию и проведение Конференции, результаты которой позитивно восприняты международным сообществом.

Все это дает основание гордиться имеющимися достижениями, но не дает основания для самоуспокоения. Критическая оценка этих результатов свидетельствует о том, что в некоторых направлениях все еще существует разрыв между возрастающим спросом общества и экономики страны на гидрометеорологические прогнозы и информацию и возможностями их удовлетворения. Хотя успешность прогнозов погоды и предупреждений об опасных гидрометеорологических явлениях и находится на уровне мировых стандартов, это достигнуто благодаря использованию не только продукции Гидрометцентра России, но и ведущих метеорологических центров других стран. Отсутствие в некоторых районах нашей страны современных технических средств, в том числе вычислительных, не позволяет полностью использовать имеющиеся достижения прогностической метеорологии при составлении прогнозов локальной погоды, включая

Book_Gidromet.indb 16 13.01.2010 13:12:21

прогноз опасных явлений. Работа по оказанию методической помощи региональным метеорологическим центрам России и периферийным оперативным прогностическим организациям страны требует большего развития и финансовой поддержки. Остается нерешенной проблема повышения точности долгосрочных прогнозов.

4. Перспективы развития Гидрометцентра России

Планом действий Правительства Российской Федерации по реализации основных положений Программы социально-экономического развития Российской Федерации на среднесрочную перспективу, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 марта 2008 г., Росгидромету и Минрегиону России совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти поручено разработать стратегию деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 г. (с учетом аспектов изменения климата).

Головным институтом по разработке Стратегии — Гидрометцентром России — совместно с другими НИУ Росгидромета и РАН подготовлен проект Стратегии, который в настоящее время проходит согласование с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти и будет рассмотрен на заседании Правительства Российской Федерации. Основными целями Стратегии являются обеспечение защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от воздействия опасных природных явлений, изменений климата (обеспечение гидрометеорологической безопасности); обеспечение потребностей населения, органов государственной власти, секторов экономики, Вооруженных Сил Российской Федерации в гидрометеорологической, гелиогеофизической информации путем выполнения федеральных и ведомственных целевых программ. Одним из основных исполнителей этих программ будет Гидрометцентр России.

Гидрометцентр России также один из основных исполнителей Плана гидрометеорологического обеспечения XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр в 2014 году в г. Сочи, вошедших в число национальных приоритетов России. В настоящее время коллективом Гидрометцентра России ведется проработка методик и технологий гидрометеорологического прогнозирования, которые обеспечат необходимой информацией проведение Игр с учетом местной орографии и климатических условий.

Book_Gidromet.indb 17 13.01.2010 13:12:22

Реализация поставленных в Стратегии целей во многом зависит от эффективной работы Гидрометцентра, а для такой работы есть необходимая материальная и научная база. Поддерживаются современный технологический цикл подготовки прогнозов, включающий численную реализацию всего спектра гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы — глобальных, региональных и мезомасштабных. Имеются технологические линии прогноза опасных явлений погоды, гидрологических и агрометеорологических прогнозов, прогнозов для авиации и мореплавания и др. Главный вычислительный центр Росгидромета, который обеспечивает непрерывную работу технологических линий прогноза, модернизирован и оснащен мощной ЭВМ. Сеть персональных ЭВМ обеспечивает автоматизацию оперативных задач и доступ к выходным параметрам численных моделей. Создана автоматизированная технология усвоения данных наблюдений и система их объективного анализа для оперативного счета численных прогнозов погоды, получили развитие технологии выпуска долгосрочных прогнозов на месяц и сезон, создан ряд новых систем информационного обеспечения и управления программами для обеспечения расчетов на суперЭВМ, разработаны и внедрены в оперативную работу различные методики прогноза гидрометеорологических явлений в интересах различных отраслей экономики.

Следует отметить, что прогресс в развитии Гидрометцентра России не был бы столь существенным, если бы не чрезвычайные усилия, предпринятые Росгидрометом по обеспечению технической базы, кадрового потенциала и модернизации всей гидрометеорологической службы в целом. Тяжелое финансовое положение, сложившееся в стране в годы перестройки, отрицательно сказалось на деятельности Гидрометцентра России, и принятые меры позволили сохранить непрерывность оперативной работы и основной научный потенциал, соответствующий требованиям современной мировой науки.

Достижения мировой метеорологической науки показывают, что новые научные и практически значимые результаты могут быть получены только в случае дальнейшего развития гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы. Необходимая техническая база для этого в Гидрометцентре России имеется. Будут приняты необходимые меры также по совершенствованию всех технологических циклов численных прогнозов погоды, начиная со сбора данных, формирования баз данных объективного анализа и заканчивая заключительной обработкой выходной продукции моделей. При этом нужно шире использовать имеющиеся возможности международ-

Book_Gidromet.indb 18 13.01.2010 13:12:22

ного сотрудничества. Ведь уникальность технологических прогностических линий каждого метеорологического центра обусловлена лишь техническими возможностями каждой страны, а отнюдь не научными достижениями, и поэтому совершенствовать их можно не только на основании собственных разработок.

При проведении научных исследований также нет необходимости последовательно повторять полученные за рубежом результаты, целесообразно адаптировать их к региональным особенностям России. Нельзя догнать более сильного человека, последовательно повторяя его путь, можно догнать лишь сократив этот путь. Нужно начинать исследование процессов, знание которых в будущем позволят получить результаты, увеличивающие предел предсказуемости моделей, повысят успешность и точность прогнозов. Для этого нужно сформулировать тематику исследования, опираясь не только на существующие, но и на будущие требования экономики страны. Гидродинамические модели общей циркуляции позволяют интегрировать результаты исследований динамики атмосферы, полученные ранее учеными нашей страны, заново проверить их эффективность и возможность использования и развития. Политические и языковые преграды того времени не сделали эти результаты известными широкой научной общественности, хотя научная значимость их велика, а практическая применимость может быть полезной. Гидродинамические модели позволяют также более точно и комплексно исследовать взаимодействие тропосферы и стратосферы, а благодаря регулярным данным наблюдений за озоном можно определить механизмы его воздействия на общую циркуляцию атмосферы и, в конечном счете, на погоду.

Выше уже говорилось, что современная оперативная технология подготовки прогнозов для пункта (территории) коренным образом отличается от прежней. Теперь она целиком основывается на использовании выходной продукции гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы. В то же время, принимая окончательное решение при формулировке прогноза, синоптик, по-прежнему, руководствуется синоптическим (фронтальным) анализом процессов. Тенденции в развитии прогностической метеорологии свидетельствуют о сохранении такого положения и в будущем. В связи с этим потребуется увеличение знаний, касающихся физики мезомасштабных атмосферных процессов, детальной структуры атмосферных фронтов и концептуальных моделей опасных явлений погоды.

Опираясь на данные гидродинамического моделирования, особенно, на результаты расчетов мезомасштабных моделей и исполь-

Book_Gidromet.indb 19 13.01.2010 13:12:23

зуя эти модели в качестве инструмента исследования, можно более досконально изучить особенности строения атмосферных фронтов, использовать результаты как для составлений прогнозов погоды, так и для совершенствования самих моделей, особенно, параметризации пограничного слоя.

Обобщенные сведения о строении фронтов и возможные региональные и локальные особенности их развития приведены в Руководстве по краткосрочным прогнозам погоды, подготовленным Гидрометцентром России еще в 1986 году. Однако эти сведения не охватывают весь спектр новых представлений о строении атмосферы и требуют дополнений и пересмотра некоторых установившихся в то время взглядов. То же самое относится и к физико-статистическим методам прогноза отдельных метеорологических величин и явлений погоды, изложенных в Руководстве. Настала пора подготовки и создания нового Руководства, отражающего сегодняшнюю прогностическую систему. Кстати, новое Руководство могло бы стать основой подготовки метеорологов-бакалавров в высших учебных заведениях страны.

Перечисленные задачи трудные, требуют чрезвычайных усилий, но вполне выполнимы. Степень выполнения этих задач будет определять не только будущее Гидрометцентра России, но во многом и будущее прогностической гидрометеорологии в нашей стране. Анализ богатой истории развития Гидрометцентра и его прошлых достижений дает все основания полагать, что и на этот раз поставленные задачи будут решены.

Book_Gidromet.indb 20 13.01.2010 13:12:23

Разработка схемы трехмерного вариационного усвоения данных в Гидрометцентре России

М.Д. Цырульников, П.И. Свиренко, В.Е. Горин
Гидрометцентр России
М.Е. Горбунов
Гидрометцентр России, Институт физики атмосферы РАН
Е.Г. Климова
СибНИГМИ, Институт вычислительных технологий СО РАН

Введение

Усвоение данных — базовая технология для многообразных научных и практических приложений в метеорологии и океанографии (а также экологии и других науках об окружающей среде). Суть усвоения данных — это формирование наиболее точной оценки текущего состояния системы (атмосферы, океана и т.п.) на основе всех имеющихся наблюдений с помощью математической модели системы. Цель усвоения данных двоякая: во-первых, это мониторинг состояния системы (атмосферы или океана), включая накопление статистики и климатические исследования, а во-вторых, это прогноз состояния системы. Наличие в стране конкурентоспособной оперативной системы усвоения метеорологических наблюдений собственной разработки является одним из существенных показателей реальной независимости государства. Существующие в стране (фактически, только в Гидрометцентре России) системы усвоения устарели и не отвечают современным требованиям. Поэтому с 2005 года в Гидрометцентре России была начата разработка принципиально новой системы усвоения данных.

1. Постановка задачи

К разрабатываемой системе предъявляются следующие требования.

1. Система должна основываться на наших собственных разработках как на уровне методики, так и на уровне алгоритмов и программного кода. Это принципиально важно для обеспечения гидрометеорологической безопасности страны, а также дает возможность опережающего развития (невозможного в случае копирования зарубежного опыта).

Book_Gidromet.indb 21 13.01.2010 13:12:23

2. Система усвоения должна быть применима для решения задач на всех масштабах от глобального до мезомасштаба.

3. Система должна обеспечивать эффективное усвоение спутниковых наблюдений, являющихся в настоящее время основным источником информации о земной атмосфере.

4. Ядро системы должно быть применимо для усвоения данных наблюдений в океане, а также экологических и прочих наблюдений.

5. Система должна быть способна усваивать данные наблюдений в верхних слоях атмосферы. После соответствующей доработки система усвоения должна быть применима для решения задач атмосферной химии (распространения и эволюция газообразных загрязнений, озона, аэрозолей и т.п.).

6. Система должна иметь потенциал развития для использования в рамках будущего ансамблевого фильтра Калмана.

7. Система должна быть вычислительно эффективной.

Таким образом, требуется создать единую научную и технологическую базу для решения задачи усвоения данных как в атмосфере Земли, так и в Мировом океане. Унификация методики усвоения в этих геофизических средах в широком диапазоне пространственных масштабов (от глобального до локального) позволит избежать дублирования и сконцентрироваться на создании наиболее эффективной методики усвоения данных — как в смысле наиболее полного извлечения информации из имеющихся наблюдений, так и в смысле вычислительной эффективности при практической реализации этой методики. Такая унификация представляется особенно важной ввиду быстрого усложнения технологий усвоения данных и увеличения объема поступающих данных, с одной стороны, и ограниченностью имеющихся ресурсов, с другой стороны.

2. Выбор метода решения задачи

Из соображений перспективности и эффективности, в качестве базовой технологии мы выбрали трехмерное вариационной усвоение (3D-Var) с дальнейшим переходом к ансамблевому усвоению (фильтру Калмана). Технология 3D-Var (с использованием так называемого инкрементного подхода) даст эффективное прямое усвоение спутниковых наблюдений, а фильтр Калмана — ковариации ошибок прогноза, зависящие от структуры атмосферного или океанского потока и наличия, а также точности данных наблюдений в недавнем прошлом.

Book_Gidromet.indb 22 13.01.2010 13:12:24

Существенное отличие нашего подхода от зарубежных аналогов состоит в том, что в ансамблевом усвоении мы не будем пользоваться непосредственно выборочными ковариациями (по ансамблевой выборке, как это общепринято), поскольку эти ковариации сильно зашумлены при неизбежно небольшом ансамбле. Вместо этого, мы предложили создать достаточно развитую *параметрическую* модель пространственных (а затем и пространственно-временных) ковариаций и оценивать, на каждом шаге усвоения, лишь ограниченное число *параметров* модели ковариаций, что позволит эффективно подавлять выборочный шум. Прообраз такой параметрической модели — модель трехмерных ковариаций, предложенная в [1].

3. Обзор достигнутых результатов

Для создания системы 3D-Var, удовлетворяющей поставленным требованиям, нами была предложена новая и оригинальная схема пространственных ковариаций на основе *трехмерных линейных фильтров* типа авторегрессии — скользящего среднего. Предложенная методология значительно отличается от существующих в мире и позволяет моделировать многообразные пространственные структуры, включающие неоднородность трехмерных ковариаций, анизотропию, вертикальный наклон, «неразделимые» трехмерные корреляции и т.п. Вычислительная эффективность анализа 3D-Var является следствием высокой степени разреженности матриц, представляющих операторы пространственного формирующего фильтра. Еще одной особенностью разрабатываемой системы, отличающей ее от зарубежных аналогов, является созданный нами блок тестирования системы с помощью *генераторов псевдослучайных трехмерных полей* в сферической геометрии. Наличие такого блока позволяет добиться высокой степени соответствия реализованной схемы и ее теоретической модели.

Большое внимание при создании системы уделяется эффективному усвоению спутниковых наблюдений — на данном этапе микроволновых и радиозатменных. В случае радиозатменных наблюдений (GPS) мы располагаем полным циклом технологий собственной разработки мирового уровня — от обработки «сырых» измерений до конечного результата. Ведется исследование пространственной статистики ошибок микроволновых спутниковых наблюдений, направленное на более эффективное извлечение из них информации о метеорологических полях. Следует отметить, что в настоящее время мы пользуемся зарубежными спутниковыми наблюдениями — в

Book_Gidromet.indb 23 13.01.2010 13:12:24

ожидании появления конкурентоспособных аналогичных отечественных систем. Проводится изучение пространственной статистики ошибок численного прогноза погоды, включая важную для потребителей область вблизи поверхности Земли.

На данном этапе (октябрь 2009 г.) создана и оттестирована на модельных и реальных контактных и спутниковых наблюдениях система линейного многоэлементного трехмерного анализа геопотенциала, давления, температуры, ветра и влажности. Область анализа распространена в высокую стратосферу (до 0,5 гПа).

Организован оперативный прием и архивация данных микроволновых наблюдений AMSU-A, радиозатменных наблюдений GPS/COSMIC и скаттерометрических измерений ASCAT. Данные AMSU-A и ASCAT поступают в Гидрометцентр России из 2-х источников: из Главного Радиометцентра (глобальное покрытие, задержка 1—3 час.) и из НИЦ «Планета» (региональное покрытие, задержка 10—60 мин.). Реализована технология усвоения измерений AMSU-A уходящей радиации в микроволновом диапазоне длин волн и основные элементы технологии усвоения радиозатменных наблюдений COSMIC. Ведутся работы по усвоению скаттерометрических наблюдений приводного ветра.

На конец 2009 г. запланированы авторские испытания системы с внешним (NCEP) первым приближением, а на 2010 г. — стыковка с глобальными прогностическими моделями Гидрометцентра России с целью создания современной отечественной системы четырехмерного усвоения данных. Дальнейшее развитие будет включать создание мезомасштабной версии анализа, а также ансамблевое усвоение, будут осваиваться новые виды спутниковых наблюдений, будет поддерживаться реализованная в настоящее время применимость ядра системы для усвоения в океане [2].

4. Новая модель пространственных ковариаций поля ошибок первого приближения

Модель ковариаций поля ошибок первого приближения есть основа системы вариационного усвоения и ее основной отличительный признак. Именно ковариации поля ошибок первого приближения, вместе с ковариациями ошибок наблюдений, определяют относительные веса, с которыми используется численный прогноз и разные виды наблюдений, т.е. определяют степень оптимальности системы.

Для достижения требуемой от системы усвоения универсальности мы задаем модель ковариаций в физическом пространстве, так как

Book_Gidromet.indb 24 13.01.2010 13:12:25

спектральные модели привязаны к конкретной области (глобальная или региональная) и геометрии (сферической или декартовой). Мы формулируем нашу модель конструктивно, т.е. задаем модель не для ковариаций, а для соответствующего случайного поля ошибок прогноза. Это гарантирует сочетание устойчивости и гибкости модели и позволяет моделировать статистику, зависящую от локальной структуры атмосферного (океанского) потока [3].

Предложенная и реализованная нами модель поля ошибок первого приближения есть обобщение на 3-мерный случай модели авторегрессии — скользящего среднего (АРСС). Модель является развитием трехмерной стохастической модели, предложенной в [4]. Модель имеет вид авторегрессии по вертикали, причем коэффициенты этой авторегрессии есть дискретизованные горизонтальные интегральные операторы:

$$\xi_k = \sum_{j=k-q(k)}^{k-1} F_{kj}\,\xi_j + U_k\alpha_k, \qquad (1)$$

где k и j обозначают вертикальные уровни, ξ_k — моделируемое случайное поле на уровне k, F_{kj} и U_k — горизонтальные операторы, α_k — взаимно (между уровнями) независимые поля горизонтального белого шума, а $q(k) \geq 0$ — вертикальный порядок, зависящий от уровня.

Вычислительная эффективность анализа 3D-Var при этом следует из разреженности матричных операторов F и U, а также блочной уни-треугольности (а значит, непосредственной обратимости) матрицы S в матричном представлении модели (1) в виде:

$$S\xi = V\alpha \qquad (2)$$

(матрица V — блочно-диагональная).

Разработана система оценивания (синтеза) формирующих операторов модели ковариаций. Система основана на спектральном разложении (по многочленам Лежандра) исходной горизонтальной матричной ковариационной функции, уравнениях Юла-Уокера (в спектральном пространстве) по вертикали и решении вариационной задачи минимизации функционала, представляющего собой норму отклонения модельных и эмпирических спектров.

Для моделирования совместной ковариационной структуры полей ветра и массы (геопотенциал, температура, давление, влажность) мы пользуемся стандартным подходом с использованием так называемых

Book_Gidromet.indb 25 13.01.2010 13:12:25

несбалансированных (первичных) полей и операторов баланса, связывающих первичные поля с полями анализа. В качестве первичных полей выбираются взаимно некоррелированные случайные поля, что чрезвычайно упрощает формулировку многоэлементной модели. Мы используем геопотенциал, псевдоотносительную влажность, несбалансированную функцию тока и дважды несбалансированный потенциал скорости. Операторы баланса — квази-геострофический и квази-экмановский. Оператор квази-геострофического баланса обобщает предложенный в [5] и позволяет моделировать кросс-ковариации между полем геопотенциала и полем функции тока, зависящие от широты, вертикальной координаты и горизонтального масштаба. Такая формулировка позволяет моделировать реалистичные линейные связи между геопотенциалом и функцией тока.

Наша вариационная схема отличается от применяемых в ведущих мировых центрах меньшим числом первичных полей. Мы не включаем приземное давление в их число. Это заметно упрощает как саму схему, так и технологию статистического оценивания ее параметров. Такое упрощение стало возможным за счет двух факторов. Во-первых, мы используем геопотенциал вместо температуры, а во-вторых, мы используем вертикальную координату, объединяющую достоинства как традиционной «сигма-координаты» (дающей хорошее описание приземных слоев атмосферы), так и изобарической координаты (обеспечивающей «физичность» и наличие связи между геопотенциалом и приземным давлением):

$$\tilde{p} = \frac{p_s}{p_s^f}, \qquad (3)$$

где p_s^f — **прогностическое** поле приземного давления.

5. Система тестирования схемы анализа

Уникальной особенностью разработанной нами схемы трехмерного вариационного анализа является то, что мы параллельно развиваем 2 независимые схемы: одна основная и другая более простая схема в спектральном пространстве. Обе схемы используют одну и ту же статистику ошибок поля первого приближения и статистику ошибок усваиваемых наблюдений. При тестовом усвоении «синтетических» наблюдений, квазиравномерно расположенных по горизонтали на сфере, при отсутствии серьезных ошибок в программном коде должны получаться близкие характеристики поля анализа. Мы использу-

Book_Gidromet.indb 26 13.01.2010 13:12:25

ем в качестве критерия качества близость дисперсий ошибок анализа в обеих схемах. Этот предложенный и реализованный нами подход оказался весьма эффективен при отладке схемы.

Кроме вышеописанного теста, независимому тестированию подвергаются все блоки предварительной обработки наблюдений, включая вычисление и мониторинг статистики «инноваций» (отклонений наблюдений от первого приближения) и конечно-разностные тесты для нелинейных и линеаризованных операторов наблюдений. Мы также тестируем каждую новую версию схемы анализа, усваивая одиночные наблюдения и сравнивая результат с теоретически ожидаемым. Перед окончательным тестом по результатам численного прогноза мы сравниваем наши поля анализа с доступными нам аналогичными полями зарубежных прогностических центров.

6. Усвоение микроволновых спутниковых наблюдений

В настоящее время наиболее массовыми и информативными являются спутниковые наблюдения. Их характерной особенностью (по сравнению, например, с радиозондами) является густота, а также большое количество наблюдений в единицу времени. Перечисленные факторы обуславливают высокую значимость эффективного усвоения спутниковых данных для мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы.

Эффективность усвоения спутниковых наблюдений напрямую зависит от адекватности модели их ошибок. В настоящее время в большинстве оперативных схем усвоения, используемых в мире, матрица ковариаций предполагается диагональной, хотя известно, что ошибки коррелируют по крайней мере между разными каналами спутниковых радиометров. Мы в нашей работе решили проверить это предположение (некоррелированность ошибок наблюдений). Второй целью было выяснить, имеет ли смысл учитывать в анализе коррелированность ошибок спутниковых наблюдений (если она будет обнаружена).

Для наблюдений зондировщиком AMSU-A, известным в качестве одного из наиболее информативных видов данных об атмосфере Земли, мы оценили авто- и межканальные (для каналов 6—9) горизонтальные ковариации путем сравнения этих наблюдений с радиозондами. Относительно ошибок последних мы делаем предположение, что они не коррелируют для разных профилей. Оказалось, что горизонтальные ковариационные функции ошибок наблюдений

Book_Gidromet.indb 27 13.01.2010 13:12:26

AMSU-A весьма велики и соизмеримы с таковыми для ошибок прогноза. Таким образом, при том, что пространственное разрешение спутниковой наблюдательной системы соизмеримо с разрешением прогноза, соизмеримость корреляций ошибок наблюдений и прогноза означает, что значимость ковариаций ошибок спутниковых наблюдений должна быть соизмерима со значимостью ковариаций ошибок прогноза (хотя в мире расходуются огромные ресурсы на изучение, моделирование и прогноз ковариаций ошибок прогноза и не делается почти ничего в отношении спутниковых ковариаций).

Для выявления эффекта от учета реальных корреляций ошибок спутниковых наблюдений мы использовали упоминавшуюся выше разработанную нами схему спектрального 3D-Var. При известной статистике ошибок прогноза и спутниковых наблюдений, в предположении ее горизонтальной однородности, мы генерируем псевдослучайные реализации как «истины», так и «прогноза» и «наблюдений» и, усваивая последние, оцениваем ошибку анализа путем сравнения с известной «истиной». Результаты представлены на рис. 1.

На рис. 1 видно, что ошибка оптимального анализа температуры, учитывающего корреляции ошибок спутниковых наблюдений, существенно меньше ошибки неоптимального анализа, предполагающего нулевые корреляции ошибок. Эффект от усвоения спутниковой информации, измеряемый расстоянием от кривой, помеченной FG, до кривой TUNED, (в случае *не*оптимального анализа) или кривой OPT (в случае оптимального анализа), как мы видим, может быть увеличен примерно в полтора раза в результате учета корреляций ошибок спутниковых наблюдений. В терминах горизонтального градиента температуры (т.е. если более короткие волны имеют больший вес), учет корреляций ошибок приводит к удвоению эффекта от использования спутниковых данных [6]. Это весьма существенно, так что можно сделать вывод о необходимости такового учета в оперативных схемах усвоения данных метеорологических наблюдений.

Мы также обнаружили весьма существенную (около 40% на нулевом расстоянии) кросс-корреляцию между ошибками реальных спутниковых наблюдений AMSU-A и ошибками 6-часового прогноза NCEP, используемого нами в настоящее время в качестве первого приближения при анализе [6]. Далее, мы выявили значительные временные корреляции ошибок спутниковых данных (с радиусом декорреляции около 2 суток). Следует заметить, что во всех известных нам схемах усвоения всеми этими авто- и кросс-корреляциями

Book_Gidromet.indb 28 13.01.2010 13:12:26

всегда пренебрегают. Более того, сама методология последовательного усвоения (согласно которой на каждом цикле усвоения собственно усваиваются только текущие наблюдения, а информация обо всех прошлых наблюдениях суммирована в полях первого приближения и ковариациях их ошибок) становится неприменимой при наличии временны́х корреляций.

Стандартным способом свести задачу с коррелированными по времени ошибками к задаче с некоррелированными по времени ошибками является метод расширения вектора состояния путем добавления к нему вектора коррелированных ошибок наблюдения и введения модели эволюции этих последних. Мы реализовали этот подход для скалярной задачи и обнаружили, что существенный эффект от учета временны́х корреляций ошибок наблюдения может быть достигнут только если корреляции ошибок наблюдения со сдвигом, равным продолжительности цикла усвоения (обычно 6 час. для глобального усвоения), превышают 99%. Оцененные нами временны́е корреляции находятся в пределах 70—80%, поэтому мы делаем вывод, что при глобальном усвоении учет временны́х корреляций ошибок спутниковых наблюдений в данное время нецелесообразен [6].

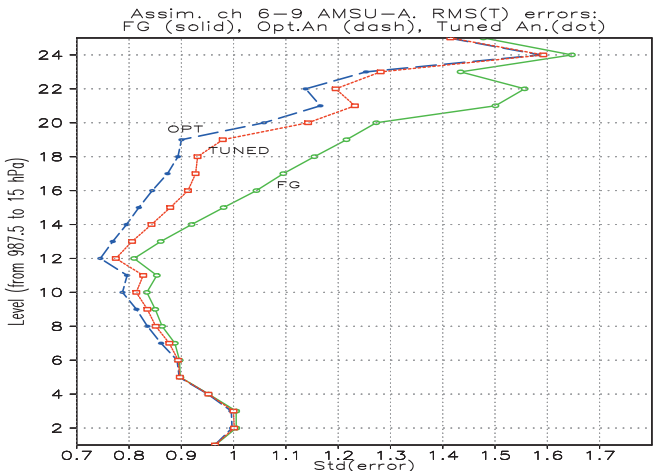


Рис. 1. *Эффект учета корреляций ошибок наблюдений в 3D-Var (температура).* Среднеквадратичные ошибки: *прогноза* (первого приближения) — кривая FG, (незакрашенные кружочки), *неоптимального анализа* — кривая TUNED (незакрашенные квадратики), *оптимального анализа* — кривая OPT (штриховая линия, закрашенные кружочки).

Book_Gidromet.indb 29 13.01.2010 13:12:26

7. Радиозатменное зондирование атмосферы Земли

Принцип радиозатменного зондирования атмосферы Земли заключается в измерении амплитуды и фазы сигнала, излучаемого передатчиком, расположенным на одном искусственном спутнике Земли, и принимаемого специальным приемником, который находится на другом искусственном спутнике. Этот принцип был сформулирован еще в 1960-е годы и с успехом применен для планетных атмосфер. Первые эксперименты по радиозатменному зондированию атмосферы Земли были предприняты в 1970-е и 1980-е годы. Однако полученные тогда результаты лишь продемонстрировали принципиальную осуществимость такой схемы зондирования, но точность полученных данных была недостаточна для целей численного прогноза погоды.

Ситуация кардинально изменилась с запуском системы GPS. В 1987 г. Гурвичем и Красильниковой было впервые предложено использовать высокостабильные сигналы системы GPS для радиозатменного зондирования атмосферы Земли.

К достоинствам радиозатменного метода следует отнести низкую стоимость аппаратуры, глобальное покрытие и всепогодность.

Однако попытки интерпретации данных зондирования нижней тропосферы (ниже 5 км, прежде всего, в тропиках) наталкивались на трудности. Получавшиеся вертикальные профили угла рефракции оказывались неоднозначными функциями прицельной высоты луча. В первых попытках интерпретации этих данных использовали соответствующее сглаживание и монотонизацию. Горбуновым было выдвинуто предположение, что трудности обусловлены многолучевым распространением [7]. Стандартные методы, которые были разработаны к тому времени, основывались на предположении, что между источником и приемником имеется лишь один радиолуч. Однако для достаточно сложной структуры поля оптической плотности атмосферы это предположение нарушается. Горбуновым был разработан метод интерпретации радиозатменных данных, использовавший волновую оптику [7]. Этот метод использовал обращение волнового фронта.

В 2000 году был начат эксперимент CHAMP (Challenging Minisatellite Payload, Германия и США). На спутнике CHAMP был установлен приемник Black Jack с улучшенными характеристиками, разработанный в JPL. Данные CHAMP были подвергнуты тщательному анализу с использованием как метода обращения волнового фронта, так и радиоголографического метода [8]. В результате было показано, что

Book_Gidromet.indb 30 13.01.2010 13:12:27





отмечавшиеся ранее проблемы с интерпретацией данных в нижней тропосфере еще далеки от решения. Это объяснялось отчасти ограничениями, присущими методу обращения волнового фронта, но в большей степени неточностью самих измерений. Проблема заключалась в том, что приемник работал в режиме фазовой автоподстройки. Этот режим позволяет хорошо следить за фазой сигнала лишь в том случае, когда вариации фазы являются достаточно медленными. Между тем, для измерений сигналов, прошедших через нижнюю тропосферу, характерны именно быстрые вариации фазы.

Первая часть проблемы была решена Горбуновым, который применил математический аппарат, разработанный Масловым, Егоровым и Хермандером, и нашел общее решение проблемы интерпретации данных измерений в многолучевых областях [9, 10].

Решающий прорыв в области техники измерений произошел в 2006 году, когда был начат эксперимент COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate). COSMIC — это система из 6 низкоорбитальных спутников, оснащенных приемниками, работающими в режиме открытой петли, т.е. без фазовой автоподстройки. Этот режим измерений в сочетании с развитым математическим аппаратом для решения обратной задачи позволил существенно улучшить точность восстановления параметров тропосферы. К достоинствам радиозатменного метода было добавлено еще одно: высокое вертикальное разрешение, которое может достигать десятков метров.

К настоящему времени Горбуновым разработана система обработки радиозатменных данных, которая может эффективно обрабатывать данные всех проведенных к настоящему времени экспериментов (GPS/MET, CHAMP, COSMIC, GRAS/METOP). Система постоянно совершенствуется и обладает характеристиками, не уступающими системе обработки данных, используемой в UCAR для оперативной обработки и распределения данных COSMIC. Она в данное время встраивается в систему усвоения спутниковых данных, разрабатываемую в Гидрометцентре России. Обработка данных строится по следующей схеме. Исходные данные измерений системы COSMIC скачиваются из системы архивации и хранения данных UCAR в режиме реального времени. Далее выполняется первичная обработка данных, в ходе которой восстанавливаются профили угла рефракции, а затем в приближении малых горизонтальных градиентов восстанавливаются профили показателя преломления. После выполняется прямое вариационное усвоение показателя преломления в схеме 3D-Var.

Book_Gidromet.indb 31

13.01.2010 13:12:27

Показатель преломления является известной функцией таких метеорологических переменных, как температура, удельная влажность и давление:

$$n = 1 + c_1 \frac{p}{T} + c_2 \frac{e}{T^2}, \qquad (4)$$

где p — полное давление воздуха, T — температура, e — давление водяного пара, а c_1 и c_2 — известные коэффициенты. Это соотношение используется в качестве оператора наблюдений для радиозатменных данных в нашей схеме.

8. Оценивание ковариаций ошибок прогноза в атмосферном погранслое

Оценка ковариаций ошибок прогноза является актуальной задачей, важной для разработки современной системы вариационного усвоения данных наблюдений. В связи с этим нами проводилась работа по исследованию структуры ковариаций ошибок прогноза в пограничном слое атмосферы, поскольку его изменчивость в зависимости от времени суток, сезона, состояния подстилающей поверхности, орографии и т.п. весьма велика и можно предположить, что это необходимо учитывать при усвоении данных.

Методика оценивания ковариаций ошибок прогноза традиционна и состоит в вычислении выборочных ковариаций невязок «прогноз минус наблюдение» для контактных приземных наблюдений SYNOP и радиозондовых наблюдений TEMP в предположении некоррелированности их ошибок, а также в предположении однородности и изотропности полей ошибок прогноза. Последняя гипотеза в дальнейшем будет ослаблена (при использовании статистики ансамблевых прогнозов). Рассматривались горизонтальные, вертикальные и «наклонные» ковариации, анализировались поля температуры, ветра и влажности 6-часового прогноза по модели WRF ARW.

Подробные результаты данного исследования можно найти в [11], здесь же мы в качестве примера приводим оценки «утренних» и «вечерних» горизонтальных ковариаций поля приземной температуры для летнего периода (см. рис. 2).

Как видно из рис. 2, радиус корреляции вечером (часто при неустойчивой стратификации и более развитой турбулентности) примерно вдвое больше, чем утром (когда стратификация обычно ус-

Book_Gidromet.indb 32 13.01.2010 13:12:28

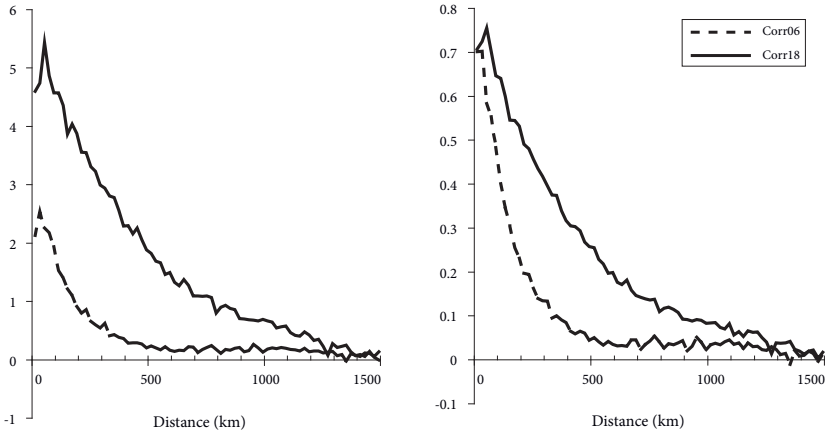


Рис. 2. Горизонтальные ковариации (слева) и корреляции (справа) за 6 ч (штриховая линия) и 18 ч (сплошная линия) местного времени.

тойчива, а турбулентность и конвекция подавлены). Аналогично, «вечерняя» дисперсия в 2—3 раза превышает «утреннюю» (следует заметить, что при оценке ковариаций по градациям расстояния каждая градация оценивалась по своей выборке, поэтому возможно поведение ковариационной функции, при котором максимальное значение достигается не в 0). Это подтверждает тезис о необходимости учета изменчивости погранслоя при усвоении данных.

Заключение

В Гидрометцентре России создана схема трехмерного вариационного анализа метеорологических наблюдений, полностью основанная на отечественных разработках — от ключевых идей до программного кода (за исключением радиационной модели RTTOV, применяемой для усвоения спутниковых данных). Новая система усвоения составит ключевой компонент системы численного прогноза в атмосфере и океане и предназначена для оперативного внедрения в Гидрометцентре России, а также в региональных прогностических центрах нашей страны. Полученные в ходе усвоения поля метеоэлементов будут также использованы для задач климатического мониторинга, экологического мониторинга и прогноза, долгосрочного прогноза и т.п. При дальнейшем развитии в сторону ансамблевого усвоения система станет конкурентоспособной по сравнению с аналогичными

Book_Gidromet.indb 33 13.01.2010 13:12:28

системами в ведущих метеорологических центрах мира. Двумерная версия схемы используется в Гидрометцентре России для оперативного усвоения данных океанографических наблюдений с 2006 г. Достоинством данной разработки является унификация теоретических подходов и технологий для процедур усвоения как метеорологических, так и океанологических данных. Подобный подход до настоящего времени в мировой практике не применялся.

Получены важные результаты мирового уровня в области усвоения спутниковых наблюдений, а именно радиозатменных и микроволновых. Для радиозатменных данных мы располагаем «полным циклом» технологий собственной разработки (от обработки радиосигнала до оператора наблюдений), это позволит нам в будущем быстро реализовать усвоение наблюдений других (кроме используемой сейчас нами американской GPS) аналогичных навигационных систем, в первую очередь российской ГЛОНАСС. Для пассивных микроволновых наблюдений AMSU-A нами впервые получены оценки пространственно-временных ковариационных функций их ошибок и показан существенный потенциальный эффект от учета пространственных корреляций ошибок наблюдений в анализе. Эти результаты будут в дальнейшем использованы для оптимизации оперативного усвоения этих и других спутниковых наблюдений (в первую очередь, инфракрасных многоспектральных наблюдений IASI и отечественных микроволновых наблюдений МТВЗА).

Авторы выражают признательность А.Н. Багрову и Е.А. Локтионовой за поддержание ими системы первичной обработки и контроля качества традиционных синоптических и аэрологических наблюдений, Е.А. Аверьяновой, П.П. Буравенкову и Г.В. Новикову (ГРМЦ) за организацию оперативного доступа к глобальным данным спутниковых наблюдений, С.А. Успенскому (НИЦ «Планета») за организацию оперативного доступа к данным спутниковых наблюдений регионального покрытия (система EARS), А.Ю. Недачиной, И.Э. Пуриной, И.И. Маковской и И.И. Жабиной за размещение данных спутниковых наблюдений на серверах Гидрометцентра России, раскодирование и другие работы, связанные с оперативными технологиями, Б.М. Кирюшову, Н.Д. Цветковой и В.А. Юшкову (ЦАО) за работу с полями реанализа ERA-40 в стратосфере.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России

Book_Gidromet.indb 34 13.01.2010 13:12:29

на 2007—2012 годы» по составной части темы «МЕГАПОЛИС — интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tsyroulnikov M.D.* Proportionality of scales: an isotropy-like property of geophysical fields // Quart. Journal of the Royal Meteorological Society, 2001, v. 127, N 578. P. 2741—2760.
2. *Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Свиренко П.И.* Глобальная система усвоения океанографических данных: пилотная версия // Тр. VI Российской научн.-тех. конф. «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии». СПб, 23—25 мая 2007. С. 464—472.
3. *Tsyrulnikov M., Svirenko P.* A new flexible and parsimonious 3-D physical-space covariance model for variational assimilation // Proc. of 2nd THORPEX Int. Sci. Symp., 4—9 Dec. 2006, Landshut, Germany, WMO/TD No. 1355 WWRP/THORPEX No. 7, WMO, 2006. P. 142—143.
4. *Tsyrulnikov M.D.* Stochastic modelling of model errors: a simulation study // Quart. Journal of the Royal Meteorological Society. 2005, v. 131, N 613. P. 3345-3371.
5. *Tsyroulnikov M.D.* On the relative contribution of wind and mass observations in numerical weather forecasting. // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2003, v. 37, N 2. P. 89—112.
6. *Gorin V. and Tsyrulnikov M.* Spatial satellite observation-error statistics for AMSU-A data: estimation and implications for data assimilation // Proc. 5th WMO Symp. on Data Assimilation. 5—9 Oct. 2009, Melbourne, Australia, 225.1—225.8.
7. *Gorbunov M.E. and Gurvich A.S.* Microlab-1 experiment: multipath effects in the lower troposphere // Journal of Geophysical Research – Atmospheres. 1998, 103(D12), 13,819—13,826.
8. *Gorbunov M.E., Kornblueh L.* Analysis and validation of Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) radio occultation data // Journal of Geophysical Research. 2003, 108(D18), 4584, doi:10. 1029/2002JD003175.
9. *Gorbunov M.E.* Canonical transform method for processing GPS radio occultation data in lower troposphere // Radio Science, 2002, 37(5), 10. 1029/2000RS002592, 9-1—9-10.
10. *Gorbunov M.E., Lauritsen K.B.* Analysis of wave fields by Fourier Integral Operators and its application for radio occultation's // Radio Science, 2004, 39(4), RS4010, doi:10. 1029/2003RS002971.
11. *Климова Е.Г., Киланова Н.В., Дубровская О.А., Зарипов Р.Б.* Исследование статистической структуры ошибок краткосрочного прогноза температуры в атмосферном пограничном слое для целей объективного анализа // Метеорология и гидрология (в печати).

Региональная гидродинамическая модель Гидрометцентра России

В.М. Лосев
Гидрометцентр России

Введение

В Гидрометцентре России разработана и внедрена в оперативную практику неадиабатическая региональная схема прогноза основных метеорологических величин и осадков в σ-системе координат на территории, включающей Европу, всю Россию (в т.ч. Дальний Восток) на срок до 48 часов.

В прогностическую систему уравнений регионального прогноза включен: расчет радиационных потоков видимого, инфракрасного и длинноволнового излучений, блоки решения уравнения теплового баланса и задачи приземного подслоя, эволюционное уравнение для энергии турбулентных пульсаций. Метод параметризации приземного подслоя и пограничного слоя атмосферы разработан, используется в исследовательских вариантах модели, но пока не включен в оперативный вариант, поскольку в последнем необходим ежедневный (2 раза в сутки) бессбойный счет в реальном масштабе времени.

Новая региональная модель с включенным пограничным слоем имеет 30 расчетных уровней по вертикали, что позволяет усваивать исходные данные по ветру и геопотенциалу в нижней стратосфере (уровни 30, 50 и 70 гПа) и более детально, за счет улучшения аппроксимации по вертикали, описывать пограничный слой атмосферы.

Оперативный вариант имеет 20 расчетных уровней.

При реализации прогностической модели в σ-системе координат пришлось столкнуться с несколькими проблемами:

– выбор рельефа для данной территории;

– переход из p-системы координат в σ-систему и обратно;

– разложение на вертикальные моды и инициализация начальных данных;

– нелинейная вычислительная неустойчивость;

– аппроксимация барического градиента в уравнениях движения, особенно в районах с большим наклоном рельефа.

Book_Gidromet.indb 36 13.01.2010 13:12:29

Все их необходимо решить прежде, чем приступить к учету параметризации радиации, пограничного слоя и других неадиабатических факторов. Указанные проблемы, в основном, решены.

Описываемая модель использует схему центральных разностей по времени и сетку «С» Аракавы для территории, имеющей вид прямоугольника на карте стереографической проекции. Оперативный счет проводится на сетке 137×209 узлов, шагом по горизонтали 75 км. Область расчета охватывает Европу, большую часть Азии, включая территории всех стран СНГ. В исследовательских вариантах размер сетки, ее ориентация, шаг по горизонтали и количество уровней по вертикали задаются в зависимости от задачи и от быстродействия доступных ЭВМ. Модель можно настроить на регионы меньшей площади, но с повышенным пространственным разрешением (до 25 км), что важно для горных районов и для точной локализации фронтов, центров циклонов и антициклонов. Оперативный вариант требует 60 мин для расчета прогноза на срок до 48 часов на оперативной ЭВМ XEON-2 (осуществляется распараллеливание транслятором циклов на 2 процессора с помощью OPEN-MP). Для расчета этого же варианта на 4-процессорной ЭВМ Itanium требуется 8 мин машинного времени.

Начальные поля геопотенциала, ветра, влажности задаются на стандартных изобарических уровнях 10, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 700, 850, 925, 1000 гПа. Расчет по модели ведется на 20—30 σ-уровнях, на которые исходные данные интерполируются. По окончании прогноза надо снова перейти к P-уровням. Проблема прямой и обратной интерполяции непроста и во многом от ее успешного решения зависит адекватность учета рельефа. Метод ее решения, предложенный в настоящей работе, на наш взгляд, вполне удовлетворителен. Главным критерием является качество прогноза метеорологических полей после обратной интерполяции. Подробно все блоки модели описаны в работе [1]. В данной статье будет описана их суть и принципиальная схема алгоритма расчета прогностических полей метеорологических элементов.

Система уравнений

Переход к σ-системе координат означает, что интегрирование уравнений модели будет проводиться на спрямленной относительно рельефа поверхности. Высота рельефа задается как функция $x, y(\Gamma = \Gamma(x, y))$. Вертикальная координата $\sigma = p / p_s$, где p_s — давление

Book_Gidromet.indb 37 13.01.2010 13:12:30

на земной поверхности, которое в системе уравнений модели является эволюционной величиной. Очевидно, что уровень $\sigma = 1$ совпадает с поверхностью земли, на нем значение геопотенциальной высоты H всегда равно высоте рельефа.

Исходными уравнениями в σ-системе координат на плоскости стереографической проекции являются два уравнения движения, записанные в форме Громеко-Лэмба, которые описывают эволюционные изменения компонентов скорости ветра u и υ, уравнение притока тепла, уравнение переноса влажности, уравнение неразрывности и уравнение гидростатики в стереографической системе координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} - RT\,\frac{\partial \ln p_s}{\partial x} - \frac{\partial E}{\partial x} + \upsilon \cdot \Omega - \dot{\sigma}\,\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} - RT\,\frac{\partial \ln p_s}{\partial y} - \frac{\partial E}{\partial y} - u \cdot \Omega - \dot{\sigma}\,\frac{\partial \upsilon}{\partial \sigma}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -m^2\left(u\frac{\partial T}{\partial x} + \upsilon\frac{\partial T}{\partial y}\right) - \dot{\sigma}\left(\frac{\partial T}{\partial \sigma} - \frac{RT\gamma_a}{g\sigma}\right) + \frac{RT\gamma_a}{g}\,\frac{d \ln p_s}{dt} + Q, \tag{3}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -m^2\left(u\frac{\partial q}{\partial x} + \upsilon\frac{\partial q}{\partial y}\right) - \dot{\sigma}\,\frac{\partial q}{\partial \sigma} + S, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \ln p_s}{\partial t} = -m^2\left(\frac{\partial p_s}{\partial x}u + \frac{\partial p_s}{\partial y}\upsilon\right) - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} \tag{5}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial(\ln\sigma)} = -RT\,. \tag{6}$$

Здесь m — масштабный множитель при переходе от поверхности земли к плоскости стереографической проекции,

$m = \dfrac{1+\sin\varphi_0}{1+\sin\varphi}$, где φ — географическая широта, φ_0 — широта, через которую проводится плоскость стереографической проекции.

В уравнениях (1)—(6) $\Omega = f + m^2\left(\dfrac{\partial \upsilon}{\partial x} - \dfrac{\partial u}{\partial y}\right)$ — абсолютный вихрь, $f = 1{,}4 \cdot 10^{-4}\sin\varphi$ — параметр Кориолиса, $E = \dfrac{m^2\left(u^2+\upsilon^2\right)}{2}$ — кинетическая энергия, $\dot{\sigma}$ — вертикальная скорость в σ-системе координат, $\Phi = gH$ — геопотенциал, g — ускорение свободного падения, R — газовая постоянная сухого воздуха, Q и S в уравнениях (3), (4) — притоки тепла и влаги.

Book_Gidromet.indb 38 13.01.2010 13:12:30

Следует отметить, что под u и v в системе (1)—(6) имеется ввиду $\dot{x}/m^2$ и $\dot{y}/m^2$, где $\dot{x}$ и $\dot{y}$ — скорости на карте стереографической проекции, $\dot{x} = m \cdot u_3$, $\dot{y} = m \cdot v_3$ (u_3 и v_3 — скорости на сферической поверхности земли). Использование таких u и v удобно из-за компактности уравнения неразрывности, но следует иметь ввиду, что правильная запись уравнения неразрывности имеет следующий вид:

$$\frac{d \ln p_s}{dt} = -m^2 \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{x}}{m^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\dot{y}}{m^2} \right) \right) - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}.$$

Кроме того, в модели имеются блоки параметризации радиации, пограничного слоя атмосферы и расчета осадков.

Область интегрирования по горизонтали — прямоугольник на карте стереографической проекции, по вертикали — от $\sigma = 0$ до $\sigma = 1$.

Граничные условия следующие:

– на боковых границах по горизонтали:

граничные величины u, v, T, q, p_s (приземное давление) задаются как функции по времени из глобального прогноза большей заблаговременности,

– по вертикали:

при $\sigma = 0$ $\dot{\sigma} = 0$,

при $\sigma = 1$ $\dot{\sigma} = 0$, $\Phi = g \cdot \Gamma(x, y)$, где Φ — потенциальная функция, Γ — функция высоты рельефа над уровнем моря.

В качестве начальных условий задаются u, v, T, q как функции x, y, σ и $p_s(x, y)$ после их интерполяции с изобарических поверхностей.

Для интегрирования по времени используется метод центральных разностей, согласно которому эволюционные уравнения типа $\frac{\partial f}{\partial t} = A$ записываются для явной схемы в виде:

$$\delta_t f^{(n)} = \frac{f^{(n+1)\tau} - f^{(n-1)\tau}}{2\tau} = A^{n\tau}$$

или, если индекс n опустить, на каждом шаге интегрирования можно записать

$$\delta_t f = \frac{f^{\tau} - f^{-\tau}}{2\tau} = A^0,$$

здесь τ — шаг по времени, верхний индекс (τ) означает расчетный момент времени, (о) — начальный момент, (-τ) — момент времени ему предшествующий. На первом шаге делается односторонняя разность (метод Эйлера), т.е. $f^{\tau} = f^0 + A^0 \cdot \tau$.

Book_Gidromet.indb 39 13.01.2010 13:12:32

Конечно-разностный аналог системы прогностических уравнений

Вертикальная и горизонтальная структура полей в численной модели представлена на рис. 1.

$$\delta_t u^k = -\delta_x \Phi_k - RT\delta_x(\ln p_s) - \delta_x E_k + \overline{v}_k^{xy}\overline{\Omega}_k^y - \overline{\dot{\sigma}}_k^x \delta_\sigma u_k, \tag{9}$$

$$\delta_t v^k = -\delta_y \Phi_k - RT\delta_y(\ln p_s) - \delta_y E_k - \overline{u}_k^{xy}\overline{\Omega}_k^x - \overline{\dot{\sigma}}_k^y \delta_\sigma v_k, \tag{10}$$

$$\delta_t T_x = -m^2(\overline{u}_k^{x\sigma}\delta_x T_k + \overline{v}_k^{y\sigma}\delta_y T_k) - \overline{\dot{\sigma}}^{\sigma}\delta_\sigma \overline{T}_k^{\sigma} + \frac{RT\gamma_a}{g\sigma}(\overline{\dot{\sigma}}^{\sigma} - \delta_t(\ln p_s) - \\ -m^2(\overline{u}_k^{\sigma}\delta_x(\ln p_s)^x + \overline{v}_k^{\sigma}\delta_y(\ln p_s)^y)), \tag{11}$$

$$\delta_q q_k = -m^2(\overline{u}_k^{x\sigma}\delta_x q_k + \overline{v}_k^{y\sigma}\delta_y q_k) - \overline{\dot{\sigma}}^{\sigma}\delta_\sigma \overline{q}_k^{\sigma}. \tag{12}$$

$$T_k = (\Phi_k - \Phi_{k+1})\cdot R\ln\frac{\sigma_{k+1}}{\sigma_k}. \tag{13}$$

$$\dot{\sigma}_1 = -D_1\Delta\sigma_1 + \delta_t \ln p_s \Delta\sigma_1,$$

$$\dot{\sigma}_k = \dot{\sigma}_{k-1} - \frac{D_{k-1}+D_k}{2}\Delta\sigma_{k-1} + \delta_t \ln p_s \Delta\sigma_k,$$

$$\dot{\sigma}_{N-1} = \dot{\sigma}_{N-2} - \frac{D_{N-2}+D_{N-1}}{2}\Delta\sigma_{N-1} + \delta_t \ln p_s \Delta\sigma_{N-1}, \tag{14}$$

где $\Delta\sigma_1 = \sigma_1$; $\Delta\sigma_k = \sigma_k - \sigma_{k+1}$; $D_k = \delta_x(u_k \ln \overline{p_s}^x) + \delta_y(v_k \ln \overline{p_s}^y)$.

Обозначив $\alpha_1 = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2/2$; $\alpha_k = (\Delta\sigma_k + \Delta\sigma_{k+1})/2$; к=2,N из условия, что $\dot{\sigma} = 0$ при $\sigma = 1$ получаем:

$$\delta_t \ln p_s = \sum_{i-1}^{N}\alpha_i D_i. \tag{15}$$

Последнее уравнение является эволюционным для $\ln p_s$.

Уравнения (9)—(15) представляют собой динамический расчетный блок для прогноза метеорологических величин u, v, Φ, T, p_s в σ-системе координат.

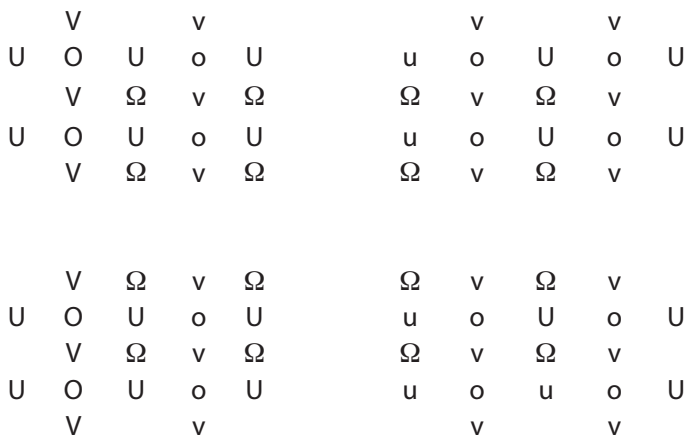
Кроме того, после каждого шага по времени применяется временной фильтр Ассилини.

$$\overline{f}^t = f^0 + \alpha(f^\tau - 2f^0 + f^\tau).$$

Book_Gidromet.indb 40 13.01.2010 13:12:33



а)



б)

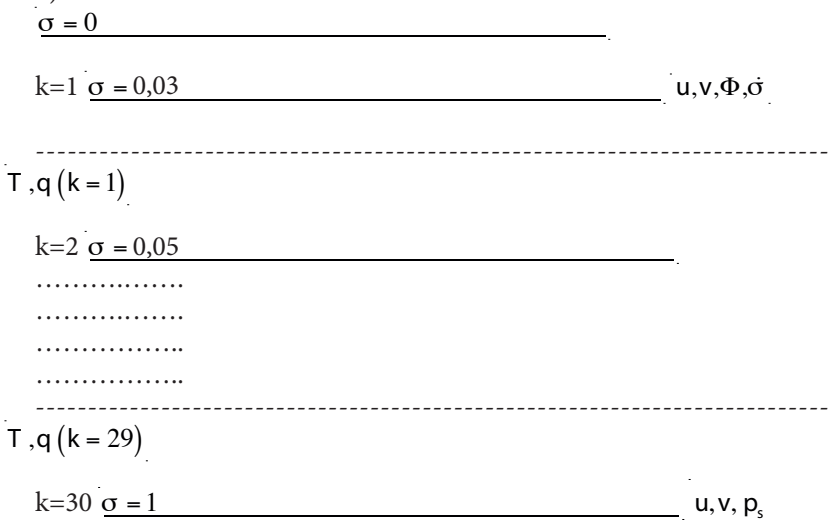


Рис. 1. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) структура численной модели атмосферы.

На рис. 1а О-точки — основные точки модели, в них рассчитываются T, H, p_s, q и задан рельеф.

Book_Gidromet.indb 41 13.01.2010 13:12:35

В u- и v-точках рассчитываются u и v соответственно, Ω-точки — вспомогательные, в них рассчитывается абсолютный вихрь скорости в разностных аналогах уравнений движения.

За исключением некоторых моментов, которые будут оговорены позднее, алгоритм численного прогноза (пока динамический блок) следующий:

1. Начальные данные u, v, H, q берутся из объективного анализа (оперативный региональный или полусферный анализ Гидрометцентра России на стандартных изобарических уровнях.

2. На каждом из уровней все функции интерполируются в О-точки (см. рис. 1) расчетной сетки на плоскости стереографической проекции, причем u и v с учетом ориентации осей x и y и масштабного множителя.

3. С помощью сплайн-интерполяции (см. [2]) определяют сначала приземное давление p_s, а затем и все функции T_k, u_k, v_k, q_k на расчетных σ_k-уровнях в О-точках. Уже на σ-уровнях u и v пересчитываются в u-точки и v-точки сетки "С" Аракавы (см. [3]).

4. С помощью диагностических соотношений уравнения гидростатики рассчитываются T_k.

5. С помощью диагностических соотношений уравнения неразрывности рассчитываются $\dot{\sigma}_k$ и значение локальной производной по времени для $\ln p_s$.

6. Для эволюционных переменных рассчитываются (для $\ln p_s$ уже рассчитано) правые части F_v для уравнений типа $\frac{\partial f_v}{\partial t} = F_v$, после чего делается шаг Эйлера по времени на $\Delta\tau$ во всех внутренних точках расчетной области в момент времени $\tau = 0$.

7. Используя уравнения гидростатики, проводится расчет Φ_k, $\Phi_k = \Phi_{k+1} + T_k / (R \ln \frac{\sigma_{k+1}}{\sigma_k})$, (интегрирование ведется снизу вверх, так как $\Phi_N = \Gamma$ для $\delta_N = 1$).

8. Повторяется п. 5 данного алгоритма.

9. Делается шаг центральных разностей по времени.

10. С помощью алгоритма расчета осадков рассчитываются величины конвективных и обложных осадков, выпавших за время $\Delta\tau$, на следующем шаге они прибавляются к уже выпавшим. Уточняются T_k и q_k там, где произошли фазовые переходы влаги.

11. Повторяются пп. 7, 8, 9, 10, 11 пока не будет сделано n шагов по времени, где $n\,\Delta\tau$ — срок прогноза.

Book_Gidromet.indb 42 13.01.2010 13:12:35

Здесь, чтобы не делать алгоритм громоздким, пока не вошли блоки параметризации радиации и пограничного слоя атмосферы.

За сроки 12, 18, 24, 36, 42, 48 ч проводится обратная интерполяция из σ-уровней на стандартные p-уровни в О-точках расчетной сетки, и для оперативной версии результаты записываются в базу данных «Прогноз».

Основные факторы, влияющие на работоспособность модели (еще не на качество)

Опишем основные факторы, влияющие на работоспособность модели и качество прогноза. Под работоспособностью модели понимается:

– отсутствие в прогнозе высокочастотных колебаний, являющихся следствием несогласованности начальных данных по геопотенциалу и ветру для численной схемы (т.е. эти данные надо согласовать);

– отсутствие линейной и нелинейной неустойчивости численной схемы;

– проблема барического градиента;

– наличие такой разностной схемы, при которой результаты численного расчета мало зависят от ошибок аппроксимации; возможность расчета по модели в реальном масштабе времени.

Подготовка начальных данных и обработка результатов расчета

Начальные данные берутся из базы данных Гидрометцентра России «Прогноз», в которую были записаны после работы оперативной полусферной схемы объективного анализа (ОА). Из сферической сетки с шагом по широте и долготе 2,5° проводится интерполяция на сетку области регионального прогноза в стереографической проекции.

Для каждой вертикали в О-точках (рис. 1а) значения метеовеличин на поверхностях 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 700, 850, 925 гПа и p_0 интерполируются на σ-уровни: 0,05, 0,07, 0,085, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3,……1. Всего 20—30 уровней, которые сгущаются в пограничном слое атмосферы , то есть около σ=1.

Функция рельефа Г(x,y) — задана. Она должна быть достаточно гладкой, поскольку в σ-системе рельеф неявно входит в H и в $T \ln p_s$ и при дифференцировании их по x берутся производные от рельефа.

Переход из изобарической в σ-систему координат и обратно осуществляется с помощью сплайн-функций (подробно см. в [2]).

Book_Gidromet.indb 43 13.01.2010 13:12:36

Нелинейная неустойчивость

Весь описанный алгоритм может быть неработоспособен при наличии нелинейной неустойчивости. В баротропном варианте модели нелинейной неустойчивости нет, в ней достаточно применить фильтр Асселини и учесть критерий Куранта, чтобы не возникло вычислительных проблем. В бароклинной модели этого недостаточно. Суть нелинейной неустойчивости заключается в том, что при разностной аппроксимации нелинейных членов типа $u\frac{\partial f}{\partial x}$ (где f — одна из эволюционных переменных) образуется остаточный член порядка h^2, в котором коэффициенты пропорциональности при четной производной f по x в уравнении переноса («+» при f_{xx}; «–» при f_{xxxx})

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u\frac{\partial f}{\partial x} + ... = F$$

входят со знаком, так что он будет иметь смысл антивязкости. При ее наличии возмущения будут сначала плавно возрастать, и в какой-то момент их значения станут сравнимы со значениями исходных величин, после чего модель «взрывается». Для устранения нелинейной неустойчивости в эволюционные уравнения добавляется член $v_f h^2 \Delta f$, где Δ — разностный аналог Лапласиана. Можно доказать, что если в добавляемом члене Δf взять в центральный момент времени, то вся схема будет неустойчива. Устойчивость будет обеспечена, если Δf взять в момент времени $-\tau$. Коэффициент v_f будет, вообще говоря, разным для разных переменных. В модели он пропорционален произведению $\left|div\vec{U}\right| \cdot |\Delta f|$ в каждой точке. Таким образом, добавляемый член будет иметь следующий вид:

$$h^2 \cdot K_{diff} \cdot \left|div\vec{U}\right| \cdot |\Delta f| \cdot \Delta f^{(-\tau)}.$$

Численные эксперименты при настройке модели показали, что члены надо взять по возможности наименьшими, поскольку их увеличение приводит к ухудшению оценки качества прогноза. K_{diff} берется единой константой для всех переменных. В настоящей версии прогноза $K_{diff} = 0{,}5$.

Проблема барического градиента

При переходе к σ-системе координат в уравнениях движения барический градиент представлен в виде суммы двух слагаемых, например, в уравнении движения для u $(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + RT\ \frac{\partial \ln p_s}{\partial x})_{\sigma=const}$. Подробно

Book_Gidromet.indb 44 13.01.2010 13:12:37

этот вопрос исследован автором в работе [4]). При наличии рельефа со значительной крутизной $\frac{\partial \tilde{A}}{\partial x}$, от крутизны рельефа зависят ошибки аппроксимации и первого, и второго слагаемого, но с противоположным знаком. Различие в аппроксимации учета рельефа при переходе к разностной схеме дает некоторую суммарную ошибку, которой, как легко показать при аналитическом расписывании, вообще быть не должно.

Рассмотрим это на примере для уровня $\sigma = 1$, т.е. на поверхности земли. Введем T_0 и p_0 (соответственно температура и давление на уровне моря) и возьмем случай, когда они не меняются по горизонтали. Как ранее говорилось, T_s ($T = T_s$ при $\sigma = 1$), p_s, p_0 и T_0 связаны между собой соотношениями

$$T_s = T_0 - \gamma \Gamma; \quad \frac{p_s}{p_0} = \left(\frac{T_s}{T_0}\right)^{\delta}, \text{ где } \gamma = 0{,}0065 K/m; \ \delta = \frac{g}{\gamma R}.$$

Введя обозначение $f = \frac{T_s}{T_0}$, легко убедиться, что первый член барического градиента $g\frac{\partial H}{\partial x}_{\sigma=1} = g\frac{\partial \tilde{A}}{\partial \tilde{o}} = -RT_0\delta\frac{\partial f}{\partial x}$, второй член $RT_s\frac{\partial \ln p_s}{\partial x} = RT_0 \cdot f\frac{\partial}{\partial x}\ln f^{\delta}$. Таким образом, сумма двух этих членов имеет вид

$$RT_0 = (-\delta\frac{\partial f}{\partial x} + f\frac{\partial \ln f^{\delta}}{\partial x}).$$

Аналитически последнее выражение тождественно равно нулю. В схеме и первый и второй члены дифференцируются в конечных разностях. Как показано в работе [4] для сетки «С» Аракавы остаточный член аппроксимации выражения в скобках равен $\frac{\delta}{12}h^2 \cdot \frac{(f')^3}{f^2}$.

При шаге по горизонтали меньшем, чем 150 км и реальных f' остаточный член невелик. Он может сказаться только разве что над горными районами. Тем не менее, можно записать барический градиент в форме, при которой аналогичная ошибка отсутствует, а именно:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} + RT\frac{\ln p_s}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} - g\frac{T}{T_s}\frac{\partial \tilde{A}}{\partial x} + RT\frac{\partial \ln p_0}{\partial x} + g\frac{T}{T_s}\tilde{A}\frac{\partial \ln T_0}{\partial x}.$$

Аналогично записывается барический градиент по y.

Очевидно, что при $\sigma = 1$ первые два члена нового выражения взаимно уничтожаются. Установлен факт, что если рельеф не сглаживать, то при обычном расписывании барического градиента возникает нелинейная неустойчивость, а при применении последней формулы ее нет.

Book_Gidromet.indb 45 13.01.2010 13:12:38

Инициализация начальных полей геопотенциала, ветра и приземного давления

Основная идея инициализации принадлежит Махенхауеру [5], применительно к региональному прогнозу на ее основе в Гидрометцентре России разработан метод нелинейной инициализации (см. [6], [7]). Решение бароклинной системы уравнений атмосферной гидротермодинамики может быть разложено на вертикальные моды — собственные решения соответствующего линейного дифференциального оператора. Коэффициенты разложения по вертикальным модам описываются системой трех эволюционных уравнений, аналогичной той, которой удовлетворяют геопотенциал и два компонента скорости ветра в баротропной модели атмосферы. «Баротропные» системы, отвечающие разным модам, различаются одним параметром — скоростью распространения гравитационных волн, поэтому метод нелинейной инициализации сначала разрабатывается для баротропной модели, а в бароклинной модели инициализации подвергаются указанные коэффициенты разложения.

Решение линейного оператора баротропной задачи представлено в виде суммы решений, два из которых (быстрые моды) отвечают гравитационным волнам и одно (медленная мода) — волне Росби. Удовлетворение требованиям стационарности операторов, найденных для быстрых мод, и неизменности в процессе инициализации оператора, отвечающего медленной моде, позволяет так изменить начальные поля ветра и геопотенциала, что при интегрировании по времени амплитуды быстрых гравитационных мод не будут расти. Этим требованиям можно удовлетворить, организовав специальную итерационную процедуру. Каждая итерация состоит из двух этапов: нахождения по начальным для итерации полям скорости ветра и геопотенциала их производных по времени (делается шаг по времени численной прогностической схемы), которые входят в правую часть некоторой линейной системы уравнений; решения этой системы. Определяющие изменения указанных полей производятся на этой итерации. Этот алгоритм описан в работах [6] и [7]. Он оказался быстро сходящимся — изменение ветра и геопотенциала уже на десятой итерации были малы (в сравнении с первой итерацией).

По алгоритму, разработанному для баротропного варианта, инициализации подвергаются коэффициенты разложения по баротропной и трем первым бароклинным вертикальным модам. Инициализация позволяет избежать ложных колебаний во временных

Book_Gidromet.indb 46 13.01.2010 13:12:39

изменениях метеорологических полей с периодом порядка 6 часов, особенно заметных в первые 12 часов прогноза. Например, геопотенциал на уровне 500 гПа в одной из центральных точек расчетной области без инициализации начальных данных имеет амплитуду таких колебаний порядка 4—6 дам при характерной изменчивости 4 дам/сут. После инициализации такие колебания практически отсутствуют. Плавность расчетных тенденций позволит более эффективно подойти к проблеме усвоения данных и параметризации процессов фазовых переходов атмосферной влаги.

Параметризация неадиабатических факторов в региональной модели

Одной из важнейших величин, которую мы желаем уточнить, привлекая параметризацию неадиабатических факторов, является температура поверхности суши, моря и ледяного покрова T_s. Ее расчет приводится с помощью уравнения теплового баланса:

$$H_s + LE_s + \sigma_{sB} T_s^4 + B_s = (1 - \alpha_s) S_g + F_g,$$

где σ_{sB} — постоянная Стефана-Больцмана, α_s — альбедо поверхности, H_s и LE_s — турбулентные потоки явного и скрытого тепла, S_g — поток коротковолновой радиации, F_g — длинноволновый компонент радиации. В случае суши поток B_s рассчитывается по формуле

$$B_s = \lambda (T_s - T_H) / H,$$

где H — соответственно глубина, на которой задана климатическая температура в почве,
λ — коэффициент теплопроводности и T_H — климатическая температура в почве или температура замерзания морской воды.

Прежде чем перейти к расчету радиационных составляющих уравнения баланса, надо определиться с альбедо подстилающей поверхности α_s. Есть соотношения для его определения для суши, для моря, для ледяного покрова. В областях, покрытых снегом, задается процедура расчета высоты снежного покрова, т.е. вычисляется скорость плавления снега (или льда).

Физика радиационных процессов реализована в виде процедур для расчета радиационных притоков к атмосферным слоям и для расчета компонент радиационного баланса B_g:

$$B_g = \sigma_{sB} T_s^4 - F_g - S_g.$$

Book_Gidromet.indb 47 13.01.2010 13:12:39

Входными параметрами процедуры являются вертикальные профили температуры и удельной влажности, приземное давление, альбедо подстилающей поверхности, общее содержание озона в столбе атмосферы, температура и влажность подстилающей поверхности, склонение Солнца с учетом времени года и суток, значение солнечной постоянной, концентрация углекислого газа, среднее расстояние от Земли до Солнца в зависимости от времени года.

В радиационном блоке с помощью интегральных функций пропускания атмосферных газов H_2O, CO_2 и O_3 вычисляется эффективный поток длинноволновой радиации $F(z)$. Расчет этой функции зависит также от наличия облачности. После вычисления $F(z_i)$ определяем длинноволновый радиационный баланс подстилающей поверхности $\sigma_{sB}T_s^4 - F_g$.

Коротковолновая компонента притока (видимая и инфракрасная части Солнечной энергии) и радиационного баланса подстилающей поверхности S_g также вычисляется в радиационном блоке.

Параметризация радиационных процессов

При увеличении числа уровней по вертикали в региональной модели до 30 расчет радиационных потоков для коротковолнового (видимого и инфракрасного (ИК)) диапазона спектра, содержащего более 90% всей лучистой энергии Солнца, становится настолько громоздким и сложным, что прогноз по региональной модели с учетом неадиабатических факторов в реальном масштабе времени становится проблематичным даже на ЭВМ нового поколения. Пока, ввиду маломощности доступных ЭВМ, приходится делать упрощения, в результате которых понижается точность расчетов.

При малом числе сеточных уровней и грубом описании облачных слоев считалось приемлемым рассматривать приближенно один объединенный облачный слой, когда легко выписываются конечные выражения для альбедо и радиационных потоков, после чего строится алгоритм их расчета. При улучшении аппроксимации появляется возможность описания отдельных облачных слоев, но в этом случае даже запись формул для альбедо и радиационных потоков из-за многократности отражений реализуема только в виде сложных комбинаций рядов. В то же время вполне возможно построение эффективного разностного алгоритма расчета этих параметров в рамках методологии интегральных функций пропускания (ИФП), где спектр радиационного излучения традиционно разбит на три относительно

Book_Gidromet.indb 48 13.01.2010 13:12:40





однородных (по процессам поглощения и рассеяния) спектральных интервала для видимого, инфракрасного и теплового излучений. Соответствующие восходящие и нисходящие потоки существенно зависят от наличия облачных слоев и их свойств.

Упрощение алгоритма расчета радиационных потоков видимой части спектра для случая произвольного числа слоев основано на использовании рекуррентных соотношений (см. [1]), что и делает весь расчет вычислительно эффективным и независящим от часто необозримых формул.

Расчет радиационных потоков видимой части спектра

Наиболее наглядно рекуррентный метод просматривается для интервала длин волн видимого излучения (0,3 мкм $\leq \lambda \leq$ 0,75 мкм), составляющего примерно 47% от суммарного потока солнечной радиации. Для этого диапазона каждый слой частично пропускает, частично отражает, но нет источников и стоков. Здесь важно рассчитать, какая часть падающего сверху потока дойдет до поверхности.

Расчет потоков инфракрасного излучения

Более сложен расчет потоков инфракрасного (ИК) излучения (0,75 мкм $\leq \lambda \leq$ 4 мкм), составляющего $\approx$44% приходящей от Солнца радиации. В этом участке спектра учитываются: 1) поглощение в облачных и безоблачных слоях; 2) отражение, но только от облачных слоев и от поверхности Земли. Здесь мы также не будем касаться вопросов определения альбедо для этого диапазона длин волн, считая его значение известным.

Расчет потоков длинноволнового излучения

Расчет потоков теплового излучения (4 мкм $\leq \lambda \leq$ 50 мкм) на данном этапе, по существу, не содержит новых разработок. При определении потоков этого диапазона длин волн учитывается только поглощение, так что нет никаких многократных отражений и рассеиваний. Принимаем, что для этого участка спектра выполнены известные соотношения, их вид громоздок и здесь они не приводятся, отметим только, что длинноволновые потоки существенно зависят от удельных плотностей водяного пара, водяного конденсата (в наибольшей степени), углекислого газа и озона.

Book_Gidromet.indb 49

13.01.2010 13:12:40

Параметризация пограничного слоя (ПС) атмосферы в региональной модели

В основу параметризации взята K-теория и теория подобия Монина-Обухова [8] для приземного слоя. Литература по данным вопросам весьма многочисленна. Основные положения и обзор могут быть найдены, например, в работе [9].

В эволюционные уравнения гидротермодинамики, интегрированием которых осуществляется прогноз, добавляются слагаемые типа $\frac{\partial}{\partial z} K_f \frac{\partial f}{\partial z}$, где f — любая из функций u, v, T, q, соответственно компоненты скорости, температура и влажность. K_f — коэффициент турбулентности, является функцией координат и времени. Его нахождение — основная задача теории пограничного слоя атмосферы. В основе алгоритма лежит метод решения эволюционного уравнения для функции E — энергии турбулентных пульсаций, являющейся, при учете ПС, такой же переменной, как u, v, T, q. Это уравнение имеет второй порядок по вертикальной координате z, поэтому требует два граничных условия — сверху и снизу.

Основной проблемой всей задачи теории ПС является нахождение динамической скорости u_* на уровне шероховатости z_0, высота которого зависит от типа подстилающей поверхности, поле z_0 задается. Эта задача решается с помощью теории подобия Монина-Обухова для приземного подслоя $[z_0, z_1]$ — слоя постоянных потоков, где z_1 — первый нижний расчетный уровень модели. Вводится понятие «масштаб длины турбулентности L» или соответствующая безразмерная величина $\zeta = \Delta z/L$, где $\Delta z = z_1 - z_0$. В основе нахождения ζ лежит решение трансцендентного уравнения, которое оперирует безразмерными функциями безразмерных переменных Ψ_H и Ψ_M, где H означает соответствие функциям T и q; M — функциям u и v. Это уравнение имеет вид:

$$Ri_B = \zeta \cdot \frac{\Psi_H(\zeta) - \Psi_H(\zeta \frac{z_0}{z_1})}{\left[\Psi_M(\zeta) - \Psi_M(\zeta \frac{z_0}{z_1})\right]^2},$$

где Ri_B — число, пропорциональное перепаду потенциальной температуры Θ на уровнях z_1, z_0, параметру плавучести $\lambda = g/\Theta(z_0)$, Δz и обратно пропорционально $(u_1^2 + v_1^2)$.

Book_Gidromet.indb 50 13.01.2010 13:12:41

Вид безразмерных функций Ψ_H и Ψ_M в разных работах, посвященных этой теме, разный, но везде громоздкий и основан на эмпирических исследованиях. Нами эти функции взяты из классической работы Бюзенгера [10].

С нахождением ς решаются все проблемы приземного подслоя: находятся потоки тепла, импульса и влаги $K_f \frac{\partial f}{\partial z}$, (f — Θ, u, v, q), на нижней границе расчетной области модели z_1 (они не меняются внутри приземного подслоя (z_0, z_1)) и параметр u_*, через который определяется нижнее граничное значение для энергии турбулентных пульсаций E.

Последний находится из соотношения:

$$u_*^2 = C_u \cdot (u_1^2 + v_1^2),$$

где $C_u = \left[\frac{\kappa_0}{\Psi_M(\varsigma) - \Psi(\varsigma \frac{z_0}{z_1})} \right]^2$,

κ_0 — постоянная кармана.

Не вдаваясь в подробности этапов алгоритма, поскольку, кроме громоздкости выражений, они не представляют особой сложности, схема прогноза полей метеорологических величин с учетом параметризации радиации и пограничного слоя имеет вид:

1. На уровне z_1 задаются все искомые функции.

2. Рассчитываются радиационные потоки видимого, инфракрасного и длинноволнового излучений, после чего из уравнения теплового баланса находятся приземные значения температуры и влажности.

3. Решается задача для приземного подслоя. Находится масштаб турбулентности ς и через него динамическая скорость u_*, потоки тепла, импульса и влаги на уровне z_1 и граничные значения для E — энергии турбулентных пульсаций.

4. Делается шаг по времени для E, по E находятся K_f (f — Θ, u, v, q).

5. Зная K_f, делается шаг по времени для u, v, Θ, q.

6. Повторяются пп. 2—5, пока не завершится прогноз на заданный интервал времени.

Расчет осадков

При расчете обложных макромасштабных осадков в некоторых экспериментальных вариантах модели реализована идея Санквиста,

Book_Gidromet.indb 51 13.01.2010 13:12:42

согласно которой конденсация пара и выпадение осадков начинается после достижения относительной влажностью U критического значения U_0 и продолжается с ростом U_0 до значения $U_s = 1$. При этом предполагается, что если среднее по расчетной ячейке значение U удовлетворяет условию $U_0 < U < 1$, то часть ячейки размером b является облачной, в ней $U = 1$ и возможно наличие водности $\tilde{m}$. Другая часть ячейки размером $1 - b$ является безоблачной, в ней пар не насыщен, причем $U = U_0$. Водности в безоблачной части ячейки нет. Величина b является баллам облачности, Общая водность ячейки:

$$m = b\,\tilde{m} + (1 - b) \cdot 0 \tag{16}$$

Так же связаны между собой U и b:

$$U = b + (1 - b)\,U_0 \tag{17}$$

Если $U < U_0$, то $b = 0$ и вся ячейка является безоблачной. Исходное уравнение для изменения температуры, влажности и водности в ячейке:

$$T_t = A_T - \frac{L}{c_p}(E_c + E_r - Q) \tag{18}$$

$$q_t = A_q + E_c + E_r - Q \tag{19}$$

$$m_t = A_m - E_c + Q - P. \tag{20}$$

Здесь A_T, A_q, A_m… — изменения соответствующих метеорологических величин вследствие всех факторов, кроме гидрологического. В них входят адвективные, турбулентные и радиационные факторы. Остальные величины имеют следующий смысл: E_c — испарение капель из облачной зоны в безоблачную, E_r — испарение дождевых капель, падающих сверху, которое происходит лишь в безоблачной зоне, Q — конденсации пара, P — осадки, выпадающие лишь из облачной зоны. Параметры L и c_p — соответственно удельная теплота испарения и теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Предполагается также, что водность адвектируется лишь в облачную зону.

Далее принимается, что интенсивность испарения водности и падающих сверху осадков, а также образование осадков параметризованы через значения основных метеоэлементов: E_c — через водность m и дефицит влажности $1 - U$, E_r — через интенсивность осадков сверху P_r и ту же разность $1 - U$, P — через m.

Book_Gidromet.indb 52 13.01.2010 13:12:43

Интенсивность осадков сверху

$$P_r = \int_0^p (P - E_r)\frac{dp}{g} \qquad (21)$$

(g — ускорение свободного падения).

Предполагается также определенным алгоритм расчета в случае, если $U < U_0$, а $m \neq 0$ (например, уменьшение водности вследствие испарения, и повышение U вплоть до значения U=1).

Система уравнений (16)—(20) будет полностью замкнутой, если определить интенсивность конденсации Q. Надо ясно понимать, что для замыкания необходимо сделать некоторое физически понятное предположение (гипотезу), справедливость которого можно выяснить только из практики. Формулу для Q можно вывести, *если сделать предположение, что пар, поступающий за счет адвекции в облачную долю* b *ячейки, идет на поддержание насыщения в этой доле, за счет его не меняется значение величины* b, *при этом излишки конденсируются, а нехватка восполняется за счет испарения (конденсация с обратным знаком) части водности.*

Записать это можно так:

$$b\frac{\partial q_s}{\partial t} + Q = bA_q. \qquad (22)$$

Так как $\frac{\partial q_s}{\partial t} = \frac{\partial q_s}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t}$, то, с учетом (18), имеем:

$$b\frac{\partial q_s}{\partial T}(A_T - \frac{L}{c_p}E + \frac{L}{c_p}Q) = bA_q - Q, \text{ откуда}$$

$$Q = b\frac{A_q - \frac{\partial q_s}{\partial T}(A_T + \frac{L}{c_p}E)}{1 + b\frac{L}{c_p}\frac{\partial q_s}{\partial T}}. \qquad (23)$$

Здесь $E = E_c + E_r$. Теперь система (16)—(20), (23) является замкнутой.

Определение конденсации по формуле (23) физически понятно, хотя справедливость самого предположения надо еще подтвердить численными экспериментами. Эта формула используется при расчете осадков в модели регионального прогноза Гидрометцентра России.

В оперативном варианте региональной модели применяется более простой, но, как показала практика, не менее эффективный так

Book_Gidromet.indb 53 13.01.2010 13:12:44

называемый «метод устойчивых осадков». В этой параметризации учитываются неконвективные осадки. Они извлекаются непосредственно из конденсата и, мгновенно выпадая, сменяются дождем. В региональной модели Гидрометцентра России предусмотрено дождевое испарение при попадании осадков сверху в ненасыщенный слой.

Имеется также возможность расчета модели в сухом варианте, когда водяной пар отсутствует и соответствующий блок программ отключается.

Реализация региональной модели для различных регионов России и стран СНГ

Таким образом, в Гидрометцентре России разработана гидродинамическая неадиабатическая региональная модель прогноза основных метеорологических величин и осадков в σ-системе координат.

Модель внедрена в оперативную практику Гидрометцентра России для территории, включающей Европу, всю Россию, в т.ч. Дальний Восток (прямоугольник на карте стереографической проекции с сеткой 137×209 узлов, шагом по горизонтали 75 км) на срок до 48 часов.

Прогноз осуществляется интегрированием по времени уравнений гидротермодинамики.

Учитываются: рельеф, фазовые переходы влаги, радиационные потоки, взаимодействие с приземным подслоем и подстилающей поверхностью.

На основе рассчитанных полей определяются элементы погоды (приземные ветер и температура). В частности моделью хорошо прогнозируются осадки, включая сильные (более 20 мм / 6 часов) во фронтальных зонах.

Кроме основного оперативного варианта, результаты которого записываются в базу данных «Прогноз», ежедневно, 2 раза в сутки, на двухпроцессорном Xeon-2 с частотой 2,66 Ггц считается прогноз полей интенсивности осадков и давления на уровне моря с дискретностью 1 час, которые выводятся на сайт Гидрометцентра России http://www.meteoinfo.ru. для территории, включающей Европу и европейскую часть России, на сетке 121×151 точек с шагом по горизонтали 50 км. Пример одной из карт осадков приведен на рис. 2.

Проведена адаптация региональной модели к территории Дальнего Востока лабораторией метеорологических прогнозов ДальНИЦ

Book_Gidromet.indb 54 13.01.2010 13:12:45



Рис. 2. Пример расчета полей интенсивности осадков и давления на уровне моря и их визуализации для Европы и европейской части территории России.

Дальневосточного УГМС. Данный вариант уже приспособлен к прогнозу по оперативным текущим данным в реальном масштабе времени, на его основе в хабаровском метеорологическом центре создана оперативная технология краткосрочного прогноза погоды и результаты прогноза по каналам связи рассылаются в 11 ГМС зоны ответственности Дальневосточного УГМС.

Аналогичный вариант с февраля 2006 года внедрен в оперативную практику Туркменистана, предварительно настроенный автором на соответствующую территорию.

На ЭВМ Гидрометцентра Беларуси вариант модели регионального прогноза Гидрометцентра России настроен на территорию Республики Беларусь и с 2002 года внедрен в оперативную практику Гидрометцентра Беларуси. Прогноз осуществляется на 48 часов по 20-уровневой модели на сетке 91×111 узлов с шагом по горизонтали 75 км на ЭВМ Pentium III 1400. В 2008 году предполагается внедрить новый вариант в Гидрометцентре Беларуси после уже проведенной предварительной настройки этого варианта в Гидрометцентре России, предполагается разместить их на сайте http://www.pogoda.by с дискретностью 1 час.

Book_Gidromet.indb 55 13.01.2010 13:12:45

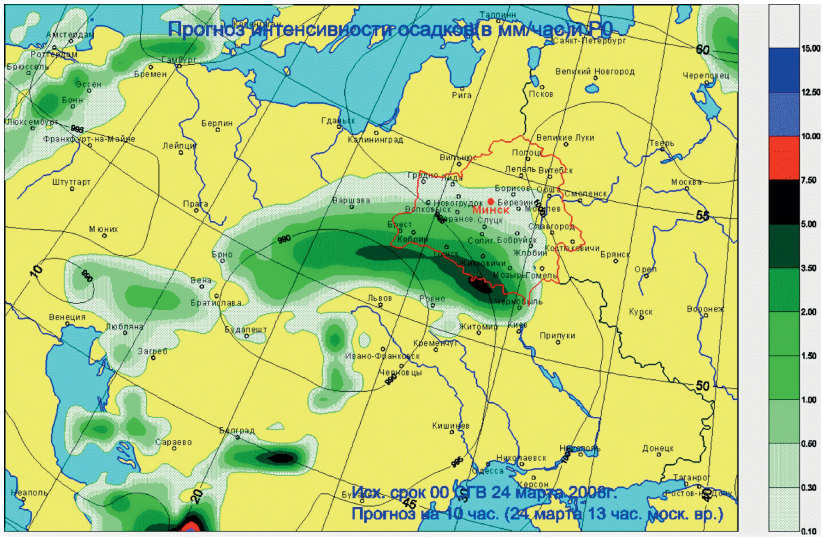


Рис. 3. Пример расчета полей интенсивности осадков и давления на уровне моря и их визуализации для Беларуси.

Пример одной из новых карт прогноза поля осадков и поля давления для территории Беларуси приведен на рис. 3.

В настоящее время проводится испытание региональной модели для **Западно-Сибирского** региона (осадки, приземная температура) и для **Северного Кавказа**.

Во всех этих вариантах осуществлена визуализация полей приземного давления и интенсивности осадков (изобары и изолинии осадков разной интенсивности на карте стереографической проекции). Картинки меняются через 1 час прогноза.

Кроме оперативных вариантов, имеются варианты модели, адаптированные для относительно небольших регионов России и стран СНГ и приспособленные для РС средней мощности. Оказалось, что модель можно настроить на регионы меньшей площади, но с повышенным пространственным разрешением (до 25 км), что важно для горных районов и для точной локализации фронтов, центров циклонов и антициклонов.

Примеры такого расчета полей осадков для территорий бассейнов рек Кубани, Оки, Уссури приведены на рис. 4—6.

Book_Gidromet.indb 56 13.01.2010 13:12:46

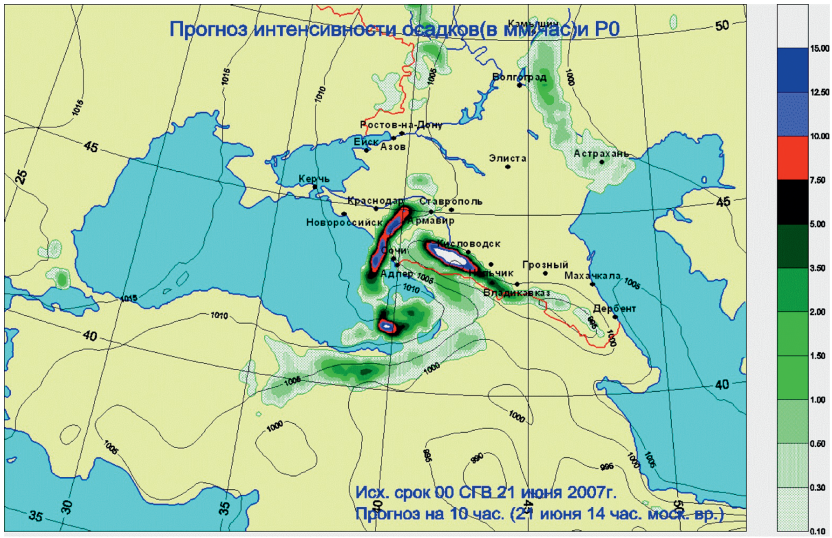


Рис. 4. Пример расчета полей интенсивности осадков и давления на уровне моря и их визуализации для бассейна реки Кубань.



Рис. 5. Пример расчета полей интенсивности осадков и давления на уровне моря и их визуализации для бассейна реки Ока.

Book_Gidromet.indb 57 13.01.2010 13:12:47



Рис. 6. Пример расчета полей интенсивности осадков и давления на уровне моря и их визуализации для бассейна реки Уссури.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лосев В.М.* Гидродинамическая конечно-разностная модель регионального прогноза на ЭВМ CRAY // Труды Гидрометцентра России. 2000. Вып. 334. С. 69—90.
2. *Кадышников В.М., Кричак С.О., Лосев В.М.* Интерполяция метеорологических полей между сигма и барическими поверхностями // Труды Гидрометцентра СССР. 1991. Вып. 310. С. 101—109.
3. *Мезингер Ф., Аракава А.* Численные методы, используемые в атмосферных моделях / Пер. с англ. Л.: Гидрометиздат, 1979. 136 с.
4. *Кадышников В.М., Лосев В.М.* Улучшенное представление барического градиента в сигма-системе координат // Метеорология и гидрология. 1993, № 7. С. 22—28.
5. *Mahenhauer B.* On the dynamic of gravity oscillations in a shallov water model with application to normal mode inicialization// Contrib. Atmos. Phys. 1977.
6. *Бурштейн А.Б., Кадышников В.М., Лосев В.М.* Нелинейная инициализация методом нормальных мод и ее влияние на региональные прогнозы // Метеорология и гидрология. 1987, № 12. С. 16—24.
7. *Кадышников В.М., Лосев В.М., Бурштейн А.Б.* Нелинейная инициализация методом нормальных мод в бароклинной региональной неадиабатической модели атмосферы // Метеорология и гидрология. 1991. № 2. С. 24—31.
8. *Монин А.С., Обухов А.М.*, Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. 1954. № 24(151). С. 163—187.
9. ECMWF, 1991: Warkshop on Fine-scale modelling and the develoupment of parametrization schemes. Reading, 16—18 September 1991.
10. *Businger J.A., Wyngaard J.C., Isumi Y. and Bradley E.F.* // Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. J. Atmos. Sci., 1977. vol. 28. P. 181—189.

Негидростатическая модель локального прогноза погоды Гидрометцентра России

Д.Я. Прессман, Е.М. Пекелис, В.З. Кисельникова
Гидрометцентр России

Введение

В статье кратко описаны три наиболее современных блока негидростатической модели Гидрометцентра России, включенной в оперативную технологию прогноза погоды для Московского и Санкт-Петербургского регионов. Площадь каждого из этих прогнозов близка к площади квадрата 300×300 км. Начальные данные (поля нижеперечисленных прогностических величин) строятся с использованием данных объективного анализа Гидрометцентра России, а краевые условия, нужные в ходе всего прогноза на 48 часов, — с использованием результатов прогноза зарубежных моделей США и Великобритании.

В оперативном варианте модели параметризация турбулентных процессов крайне упрощена. Современная версия этой параметризации (нестационарное дифференциальное уравнение для кинетической энергии турбулентности и алгебраическое соотношение для скорости ее диссипации) в оперативную модель не включена и поэтому не будет описана. Аналогична ситуация с устаревшим радиационным блоком, использующим методику интегральных функций пропускания. Разработанный нами к настоящему моменту уточненный алгоритм расчета радиационных потоков вычислительно дорог и поэтому пока оперативно не используется. По существу, этот уточненный алгоритм — вариант метода дискретных ординат, основанный на результатах работы В.А. Амбарцумяна [1] о распространении однородного потока излучения в отражающей и поглощающей среде, с раздельным описанием заданного числа полос ИК-излучения.

Также не будет рассмотрен сложный и до конца не решенный для системы уравнений локального прогноза вопрос постановки краевых условий, пропускающих выходящие из области прогноза метеорологические образования без их отражения.

Таким образом, в дальнейшем кратко будут описаны алгоритмы расчета: а) поля давления; б) адвекции примеси и количества движения; в) полей водности и температуры почвы.

Book_Gidromet.indb 59 13.01.2010 13:12:50

Система уравнений локального прогноза

В системе координат, связанной с вращающейся Землей, в атмосферной части модели численно решается система уравнений глубокой конвекции, состоящая из:

1) уравнений Эйлера (в векторной записи), линеаризованных относительно термодинамических переменных,

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + c_p\Theta_{vl}\, grad(\pi') + 2\bar{\rho}\left[\vec{\omega}x\vec{V}\right] + \bar{\rho}\,g\vec{k}\,(\frac{\Theta'_{vl}}{\bar{\Theta}_{vl}} + Q_{cw} + \\ + Q_{ci} + Q_{rw} + Q_{ri} - 0.61Q'_v) = \vec{D}_{\vec{V}} \quad (1)$$

2) уравнения неразрывности, содержащего зависящую только от вертикальной координаты плотность,

$$\nabla\cdot(\bar{\rho}\vec{V}) = 0 \quad (2)$$

3) уравнения притока тепла:

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\frac{\Theta}{\rho c_p T}\varepsilon + M_\theta + \frac{1}{\rho}D_\theta \quad (3)$$

4) уравнения эволюции влажностных субстанций в атмосфере:

$$\frac{d\Phi}{dt} = M_\phi + \frac{1}{\rho}D_\phi,\ \Phi = Q_v, Q_{cw}, Q_{ci}, Q_{rw}, Q_{ri} \quad (4)$$

5) уравнения состояния воздушной смеси:

$$\rho\,(\text{кг/м}^3) = (10^5\,\text{Па})\cdot(T/\Theta)^{1/(\kappa-1)}/(R_d\Theta_{vl}). \quad (5)$$

В (1) и (5) входит обозначение для виртуальной потенциальной температуры с учетом жидкой и твердой фаз воды, Θ_{vl}:

$$\Theta_{vl} = \Theta(1+0{,}61Q_v - Q_c - Q_r),\ Q_c = Q_{cw} + Q_{ci},\ Q_r = Q_{rw} + Q_{ri}. \quad (6)$$

Уравнения (1)—(4) с учетом определения потенциальной температуры $\Theta = T/\pi$, уравнения состояния (5) и обозначений (6) образуют систему десяти скалярных уравнений относительно десяти искомых скалярных функций: трех компонентов скорости $\vec{V} = \{u, v, w\}$, потенциальной температуры, функции Экснера $\pi = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ (P — давление, P_0 =100 000 Па — стандартное давление на уровне моря, $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ — отношение теплоемкостей воздуха

Book_Gidromet.indb 60 13.01.2010 13:12:50

при постоянном давлении и постоянном объеме) и пяти компонентов атмосферной влаги — массовых долей водяного пара (Q_v), облачной (Q_c) и осаждающейся (Q_r) воды в жидкой (Q_{cw} и Q_{rw}) и ледяной (Q_{ci} и Q_{ri}) фазах каждая. Предполагается, что любое искомое поле ϕ представляет собой результат уже осуществленного рейнольдсова осреднения исходного поля ($\bar{\phi} + \phi'$).

В приведенной системе уравнений слагаемые, обозначенные через M_ϕ и D_ϕ, соответствуют источникам и стокам субстанции ϕ ($\phi = \rho, \Theta, Q_v, Q_{cw}, Q_{ci}, Q_{rw}, Q_{ri}$) за счет влажностных ($M_\phi$) и турбулентных ($D_\phi$) процессов соответственно. В (1) через $\vec{D}_{\vec{v}}$ обозначен вектор, параметризующий влияние турбулентных потоков импульса. Первое слагаемое в правой части уравнения (3) отвечает радиационному потоку тепла.

Как всегда, параметрическое описание упомянутых процессов связано с тем, что вследствие своей высокой пространственно-временной изменчивости они не описываются непосредственно на приемлемой для прогностических расчетов сетке.

Указанная система уравнений записывается в декартовой системе координат на плоскости проекции, касающейся сферической поверхности Земли в центре области прогноза. Поверхность Земли проектируется на эту плоскость пучком лучей, параллельных радиусу, приходящему в точку касания.

Приведем формулы соответствия точек локального прогноза на плоскости проекции точкам на поверхности сферической Земли и основные параметры сетки.

Пусть центр области прогноза имеет географические координаты (φ_o, ψ_o, R). В точке касания расположен центр используемой декартовой системы координат (x, y, z), Ось $\vec{z}$ направлена вдоль радиуса Земли R_0, проведенного в точку касания плоскости проекции, ось $\vec{x}$ направлена на Восток и касается круга широты ϕ_o, ось $\vec{y}$ направлена на Север и касается меридиана ψ_o. Проектирование земной поверхности на плоскость проекции осуществляется пучком лучей, параллельных радиусу R_0. Поэтому $x = R\cos(\varphi)\sin(\psi - \psi_o)$, $y = R(\sin\varphi\cos\varphi_o - \sin\varphi_o\cos\varphi\cos(\psi - \psi_o))$. Если ввести $a = R\cos(\varphi_o)$, $b = R\sin(\varphi_o)$, $d = x^2 / R^2$, то можно найти обратные функции в виде

$$\sin(\varphi) = \frac{a \cdot y + \sqrt{a^2 y^2 - R^2 (y^2 - b^2 (1-d))}}{R^2}, \quad \cos(\psi - \psi_o) = \sqrt{1 - \frac{d}{\cos^2(\varphi)}}.$$

Отсюда $\varphi = \arcsin(\sin(\varphi))$ и $\psi = \psi_o - \arccos(\cos(\psi - \psi_o)) \cdot sign(x)$. Это величины широты и долготы точки, проектируемой в точку

Book_Gidromet.indb 61 13.01.2010 13:12:51

с координатами (x, y), в радианах. Принятая в модели сетка точек содержит точку касания в центре центрального квадрата, число точек сетки четное по x и по y и равно N=30.

Пусть точки сетки упорядочены проходами слева направо (первый индекс i= 1,……,N) и сверху вниз (второй индекс j=1,…..,N). Тогда для точки с индексами (i, j) при шаге сетки, равном ΔX км, координатами в км будут: по оси X — X=(-(N-1)/2*ΔX + (i-1)* ΔX), по оси Y — Y=((N-1)/2*ΔX - (j-1)* ΔX).

Шаг сетки равномерный по X и по У и равен ΔX =10 км. Квадрату на плоскости проекции отвечает криволинейная трапеция на поверхности Земли. Шаг сетки по вертикали меняется от нескольких метров у поверхности до 1 км вблизи верхней границы, расположенной на высоте 10,5 км. Число уровней 15. Число почвенных уровней равно 5. Один внеатмосферный слой вводится дополнительно для описания снежного покрова. Шаг по времени равен 4 минутам.

Расчет поля давления

Определение поля давления — важный этап любой численной методики прогноза погоды. Записанная в прямоугольной Z-системе координат система уравнений глубокой конвекции, когда плотность в уравнении неразрывности считается функцией только вертикальной координаты, с линеаризованными по термодинамическим переменным уравнениями движения допускает решение стационарного уравнения для давления методом разделения переменных. По этой причине соответствующий конечно-разностный аналог этого уравнения может быть решен эффективным прямым методом [2]. Суть этого метода состоит в последовательном переходе к задачам меньшей размерности, для чего необходимо одноразово для данного расчета прогноза определить собственные вектора и собственные значения соответствующих одномерных задач. Вышеупомянутая линеаризация производится с помощью фоновых (зависящих только от вертикальной координаты Z) величин, полученных осреднением по горизонтальным координатам (а если возможно, то и по времени, например, когда для рассматриваемой области известен крупномасштабный прогноз) полей давления, влажности и потенциальной температуры.

В случае неоднородного рельефа горизонтальные координатные (x,y) плоскости этим рельефом пересекаются, так что какие-то области этих плоскостей попадают под рельеф. Определяемое прямым

Book_Gidromet.indb 62 13.01.2010 13:12:52

методом давление и соответствующие ему составляющие вектора скорости становятся известными и в «фиктивных» точках разностной сетки, принадлежащих указанным областям. Так получаемые значения составляющих скорости оказываются отличными от нуля в указанных фиктивных точках, хотя в начальный момент они там нулевые. Оказывается, что в этом случае возможен итерационный процесс решения уравнения для давления, (на каждой итерации ранее определенные фиктивные скорости заменяются нулями и таковыми входят в формулы расчета правых частей уравнения для давления), который быстро сходится при любой крутизне рельефа. Сходимость понимается в том смысле, что давление устанавливается таким, что определяемая с его помощью скорость в фиктивных точках близка к нулю.

В результате получается решение задачи в декартовой системе координат при неоднородном рельефе без перехода к спрямляющей рельеф системе координат.

В неоперативной версии модели указанный переход сделан, вследствие чего в некоторых уравнениях системы возникают дополнительные слагаемые, затрудняющие приемлемое решение разностного уравнения для давления: неизбежны итерации, скорость сходимости которых зависит от крутизны рельефа.

Трудности (если оставаться в декартовой системе координат) возникают при необходимости: 1) хорошо аппроксимировать возможно сильно меняющиеся при приближении к поверхности профили прогностических величин; 2) учесть специфику слоя постоянных потоков. Именно из-за этой необходимости сетка точек в рассматриваемой модели выбирается неравномерной по высоте с тем, чтобы у поверхности точки сгущались. При неоднородном рельефе в прямоугольной Z-системе координат это сгущение может просто оказаться под рельефом. На это обстоятельство можно не обращать внимания, если сетка точек имеет высокое разрешение всюду в области, ограниченной сеточной горизонтальной плоскостью, расположенной над самой высокой точкой рельефа. Но в этом случае появляются излишние вычислительные затраты, так как при этом: 1) сеточное разрешение возрастает и там, где профили достаточно гладкие и, значит, в этом возрастании нет нужды; 2) значения скорости и давления находятся в возможно многочисленных фиктивных точках.

Заменим реальный рельеф поверхностью, составленной из вертикальных и горизонтальных прямоугольников с вершинами в точках расчетной сетки. Будем называть эту поверхность сеточным

Book_Gidromet.indb 63 13.01.2010 13:12:53

рельефом и считать, что под ней находится воздух, неподвижный во все моменты времени. Сама же расчетная область не связывается с рельефом, ее нижняя граница — координатная (x, y) плоскость, проходящая через минимальную z-координату рельефа. Искомое давление, определяемое как вне, так и внутри сеточного рельефа, должно обеспечивать указанную неподвижность.

Последовательность предлагаемых итераций на каждом временном шаге (переход от момента t к моменту $t + \Delta t$) можно представить следующим образом. Первая итерация определяет предварительные значения u^1, v^1, w^1, составляющих вектора скорости из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} u^1 = u^0 - \Delta t \cdot (c_p \cdot \bar{\theta}_v \cdot \partial \pi_1' / \partial x + F_{u^0}) \\ v^1 = v^0 - \Delta t \cdot (c_p \cdot \bar{\theta}_v \cdot \partial \pi_1' / \partial y + F_{v^0}) \\ w^1 = w^0 - \Delta t \cdot (c_p \cdot \bar{\theta}_v \cdot \partial \pi_1' / \partial z + F_{w^0}) \end{cases}, \qquad (7)$$

где

$F_{u^0}, F_{v^0}, F_{w^0}$ — определяемые по данным в начале временного шага и по краевым условиям слагаемые, содержащие адвекцию, силу Кориолиса, турбулентные слагаемые, силу плавучести и т.п.;

c_p — теплоемкость атмосферного воздуха при постоянном давлении;

$\bar{\theta}_v(z)$ — вертикальное распределение фоновой виртуальной температуры;

$\pi'(x, y, z, t)$ — отклонение функции Экснера от ее фоновой величины $\bar{\pi}(z)$;

$\pi_1'(x, y, z, t)$ — величина указанного отклонения после первой итерации.

Отклонение функции Экснера от ее фона будем искать, решая уравнение, получаемое подстановкой u^1, v^1, w^1 в уравнение неразрывности, имеющее в системе уравнений глубокой конвекции вид ($\bar{\rho}(z)$ — фоновый профиль плотности воздуха):

$$\partial(\bar{\rho}u)/\partial x + \partial(\bar{\rho}v)/\partial y + \partial(\bar{\rho}w)/\partial z = 0. \qquad (8)$$

Для решения полученного таким образом (для отклонения функции Экснера от ее фона) эллиптического уравнения второго порядка в частных производных подходит метод разделения переменных, поскольку коэффициенты при производных зависят только от заданных функций от вертикальной координаты.

Book_Gidromet.indb 64 13.01.2010 13:12:53

Краевые условия для этого уравнения получаются с помощью значений (в момент $t + \Delta t$) нормальных к границе составляющих скорости, взятых или из фонового прогноза или найденных с помощью условий типа «открытых границ». Прежде всего, специальная процедура модифицирует эти скорости, чтобы рассматриваемая далее задача типа Неймана (на границах задается комбинация нормальной производной от «давления» и первых и вторых производных по двум касательным к границам направлениям) была разрешима. Краевые условия возникают из аппроксимации уравнения неразрывности в «граничной» точке, повторяющей переход к уравнению для функции Экснера во внутренних точках, за исключением аппроксимации производной по нормали к границе, где используется уже известная модифицированная нормальная составляющая скорости.

Фактически решается уравнение несколько отличное от приведенного, так как из-за описания гравитационных волн неявной (на этапе предиктора) или полунеявной (на этапе корректора) разностной схемой:

1) коэффициент при $\partial\pi' / \partial z$ в третьем уравнении движения заметно сложнее (но он по-прежнему — фиксированная для данного прогноза функция от вертикальной координаты),

2) в правую часть входит комбинация правых частей уравнений притока тепла, эволюции влажности и водности облаков.

Разностный аналог этого уравнения решается прямым методом, основанным на последовательном уменьшении размерности задачи при разложении решения по собственным векторам возникающих при разделении переменных одномерных разностных операторов при соответствующих краевых условиях. Задача сначала сводится к определению коэффициентов разложения решения по зависящим только от координаты Z собственным векторам Z-оператора. Эти коэффициенты разложения зависят от горизонтальных координат и, в свою очередь, раскладываются в ряд по собственным векторам X-оператора. Получившиеся, наконец, одномерные задачи для определения коэффициентов разложения по собственным функциям Y-оператора эффективно решаются прогонкой. Решение уравнений этого последнего этапа определено с точностью до произвольной постоянной, которая заменяется нулем. Линейные комбинации собственных векторов с найденными коэффициентами дают решение с машинной точностью. Отметим, что определение собственных векторов и собственных значений следует проводить с удвоенной точностью. Необходимые при таком способе решения матрицы собственных векторов и обратные к ним матрицы достаточно вычислить один раз перед началом работы основной программы.

Book_Gidromet.indb 65 13.01.2010 13:12:54

Подстановка полученного отклонения функции Экснера в систему (7) определяет первую прикидку составляющих вектора скорости, которая не обязана быть нулем внутри сеточного рельефа. Следующие итерации делаются однообразно и должны привести к функции Экснера, обеспечивающей равенство нулю вектора скорости внутри сеточного рельефа. Каждый раз методом конечных разностей решается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} u^i = u^{i-1} - \Delta t \cdot c_p \cdot \bar{\theta}_v \cdot \partial \pi_i' / \partial x \\ v^i = v^{i-1} - \Delta t \cdot c_p \cdot \bar{\theta}_v \cdot \partial \pi_i' / \partial y \\ w^i = w^{i-1} - \Delta t \cdot c_p \cdot \bar{\theta}_v \cdot \partial \pi_i' / \partial z \\ \partial(\bar{\rho} u^i) / \partial x + \partial(\bar{\rho} v^i) / \partial y + \partial(\bar{\rho} w^i) / \partial z = 0 \end{cases} \qquad i = 2,3,....,N$$

где значения $u^{i-1}, v^{i-1}, w^{i-1}$ вне сеточного рельефа получены на предыдущей итерации, а внутри него — заменены нулями; N — число итераций, определяемое условием сходимости. Итерации считаются сходящимися, если получаемые внутри сеточного рельефа скорости стремятся к 0. Отметим, что каждая итерация дает очередную поправку к предыдущему значению отклонения от фона функции Экснера. В конце концов, это отклонение находится суммированием: $\pi' = \sum_i \pi_i'$. Рассчитываемые на каждой итерации скорости всюду удовлетворяют разностному аналогу уравнения неразрывности, а после их коррекции (обнуления) внутри сеточного рельефа — отдельно вне его и внутри него, и после каждой итерации могут использоваться как начальные для следующего шага по времени.

Возможности описанного алгоритма проверялись путем его включения в схему локального прогноза для территории Московского региона. Кроме теста с включением в схему высот реального рельефа, рассматривался и другой, когда в качестве рельефа внутри круга радиусом 7 горизонтальных шагов сетки ($\Delta x = \Delta y = 10$ км) вводилась сильно изрезанная гора высотой более 5 км, так что в некоторых местах вертикальный прямоугольник сеточного рельефа имеет такую же высоту. Высота H этого рельефа в метрах определялась по формуле:

$$H = 5520 \cdot \cos(R / 14 \cdot \pi) \cdot \left|\sin(2\psi)\right|,$$

в полярной системе координат (R, ψ) с центром в центральной точке расчетной области. Радиус в этой формуле измеряется в шагах сетки. В точках, где $R \geq 7$, высота рельефа считалась равной нулю.

Book_Gidromet.indb 66 13.01.2010 13:12:54

Различие между поведением невязки в этих тестах состояло в том, что на первых нескольких шагах по времени во втором тесте требовалось несколько большее число итераций (порядка 20 вместо 10) для уменьшения модуля скорости внутри сеточного рельефа от полутора десятков метров до пороговой величины в 2 мм, после чего итерации прекращались. После первого десятка шагов по времени поведение модуля скорости внутри сеточного рельефа почти не меняется: он уменьшается от величины порядка нескольких сантиметров до вышеуказанного порогового значения менее чем за 10 итераций. Ниже приведены рисунки изогипс давления и векторов горизонтальной составляющей скорости ветра для второго и первого тестов при реальных начальных данных и краевых условиях (исходный срок — 00 часов 31 января 2003 года).

Пустоты на рисунках вектора горизонтальной составляющей скорости совпадают с точками, попавшими внутрь сеточного рельефа, заменяющего реальный или модельный рельеф на четвертом Z-уровне.

Можно сказать, что:

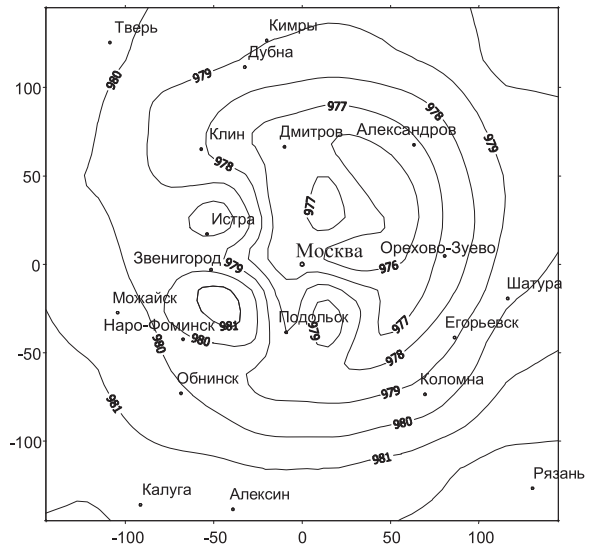
1) описанный алгоритм достаточно эффективен. В случае плоского рельефа расчет содержит только первую из описанных выше итерацию. Время расчета прогноза из-за производства последующих итераций для модели локального прогноза на сетке (30x30x15) в атмосферной области счета увеличивается не более чем в 1,4 раза при учете рельефа с весьма обрывистыми склонами (высота некоторых прямоугольников модельного сеточного рельефа более 5 км при длине основания 10 км), если итерации прекращаются при уменьшении максимума модуля скорости внутри рельефа до двух миллиметров (достаточное для этого число итераций не превышает 10);

2) скорость сходимости алгоритма после первого десятка шагов по времени мало меняется и незначительно зависит от крутизны склонов;

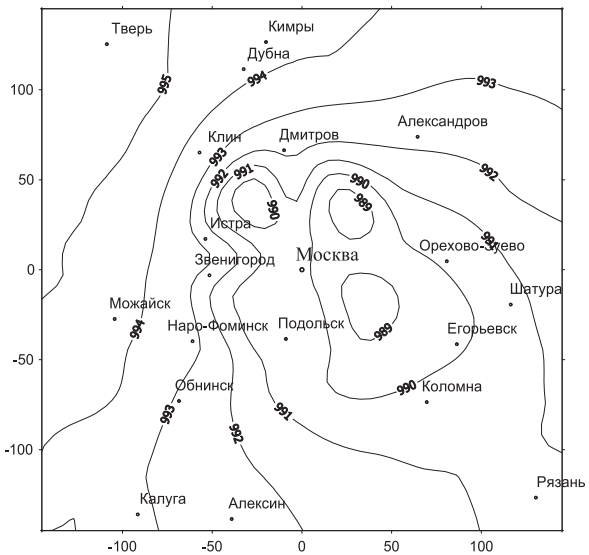
3) итерации в случае решения системы уравнений глубокой конвекции можно оборвать в любой момент, так как после каждой итерации полученные составляющие скорости удовлетворяют уравнению неразрывности.

Остановимся теперь на аппроксимации уравнения переноса (адвекции) пассивной примеси со скоростью движущейся среды и уравнений квазилинейной задачи переноса импульса.

Book_Gidromet.indb 67 13.01.2010 13:12:55

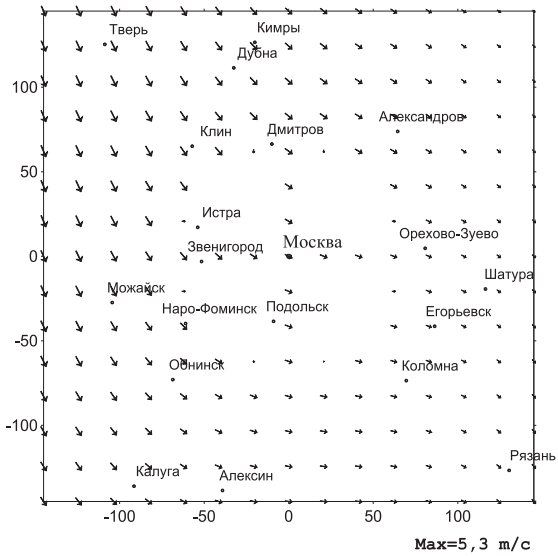


а)

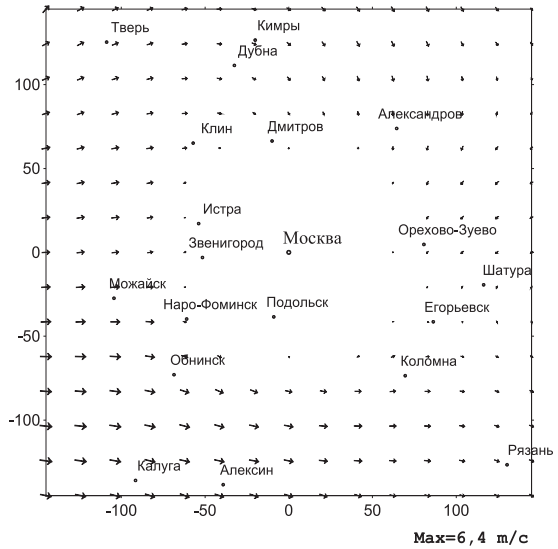


б)

Рис. 1. Давление вне и внутри модельного рельефа на нижнем расчетном уровне: а) в начале расчета; б) прогноз на 36 часов.

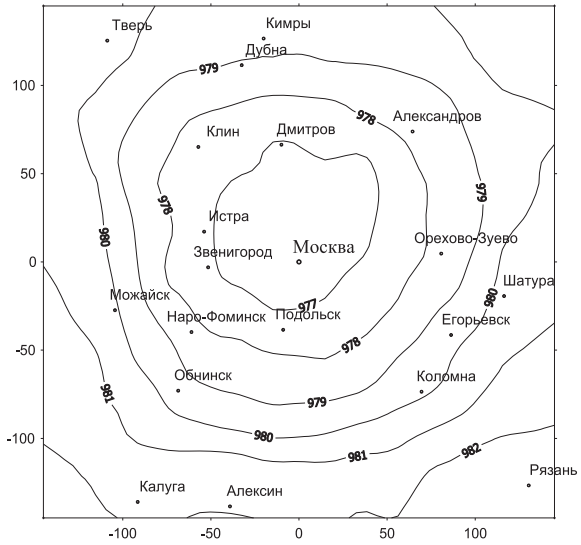


а)

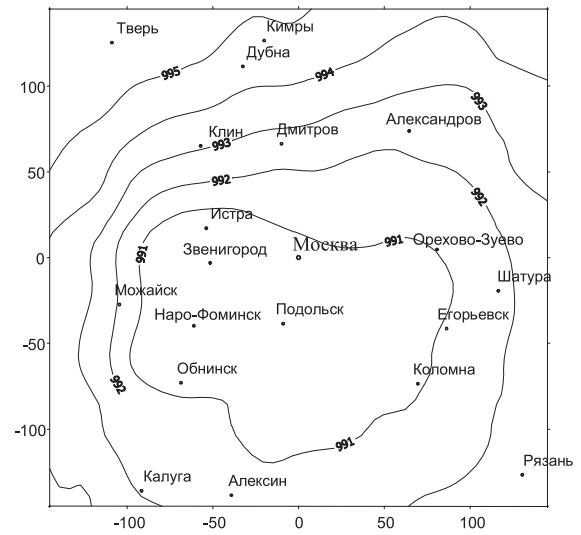


б)

Рис. 2. Горизонтальная составляющая скорости ветра на четвертом Z-уровне (40 м) в случае модельного рельефа: а) в начале прогноза: б) прогноз на 36 часов.



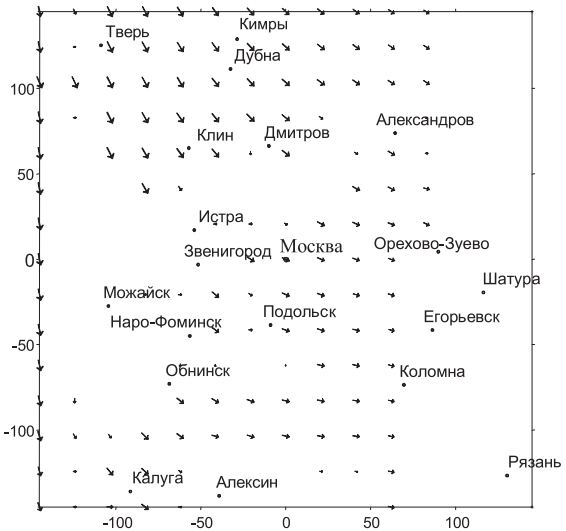
а)



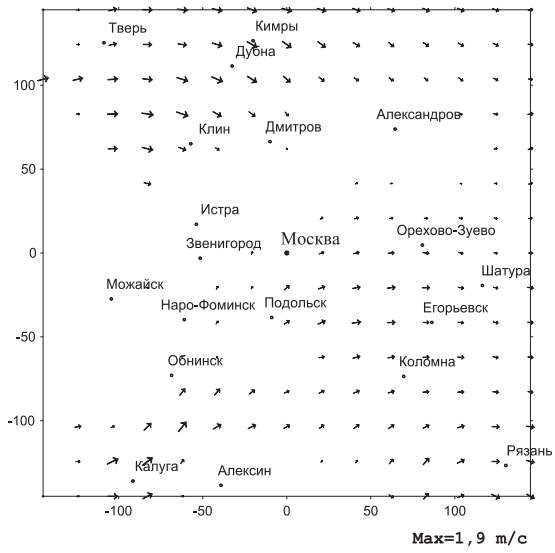
б)

Рис. 3. Давление вне и внутри реального рельефа на нижнем расчетном уровне: а) в начале расчета; б) прогноз на 36 часов.

Book_Gidromet.indb 70 13.01.2010 13:12:57



а)



б)

Рис. 4. Горизонтальная составляющая скорости ветра на четвертом Z-уровне (40 м над минимальной высотой рельефа в области прогноза) в случае реального рельефа: а) в начале прогноза; б) прогноз на 36 часов.

Book_Gidromet.indb 71 13.01.2010 13:12:57

Аппроксимация уравнений адвекции

Здесь рассматриваются только одномерные задачи переноса, так как для многомерного переноса мы считаем возможным применение метода координатного расщепления.

Будут решаться методом конечных разностей уравнения:

$$\partial f / \partial t + a \cdot \partial f / \partial x = 0 \qquad (9)$$

$$\partial u / \partial t + u \cdot \partial u / \partial x = 0, \qquad (10)$$

в первом из которых за неизвестную функцию f можно принимать потенциальную температуру, влажность, водность облаков и осадков, составляющую скорости вдоль оси, отличной от оси x; величина a — известная скорость переноса вдоль оси x. Во втором уравнении скорость переноса неизвестной величины u совпадает с этой величиной, так что вторая задача квазилинейна.

Следующие принципы положены в основу построения полунеявной разностной схемы. Во-первых, используются только направленные разности при минимальном числе точек, необходимом для полунеявной аппроксимации оператора переноса. Таким образом, сеточный шаблон содержит 4 точки: две в начале и две в конце временного шага. Их расположение на оси x зависит от направления скорости адвекции.

Во-вторых, базовой для построения требуемой схемы является абсолютно устойчивая схема второго порядка аппроксимации по координате и времени на решениях линейного уравнения (на вышеуказанном шаблоне). Оказывается, такая схема существует, и множителем перехода в ней на всех гармониках Фурье является единица.

Для уравнения (9) эту схему можно записать так:

$$\frac{f_1^{\Delta t} - f_1^0}{\Delta t} + \frac{1+r}{2 \cdot r} a \frac{f_1^0 - f_0^0}{\Delta x} + \frac{r-1}{2 \cdot r} a \frac{f_1^{\Delta t} - f_0^{\Delta t}}{\Delta x} = 0, \qquad (11)$$

где величина r — число Куранта, равное $\frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x}$.

В-третьих, ставится условие «локальной знакоопределенности», заключающееся в том, что если переносимая субстанция не отрицательна (не положительна) в трех точках шаблона, расположенных против потока и определяющих искомое значение в четвертой точке шаблона, то это искомое значение тоже не отрицательно (не положительно). Это условие для произвольной функции здесь переформу-

Book_Gidromet.indb 72 13.01.2010 13:12:58

лировано так: искомое значение должно находиться между максимумом и минимумом адвектируемой функции в трех точках шаблона, расположенных против потока.

Можно показать, что за счет уменьшения порядка аппроксимации до первого можно изменить базовую схему так, чтобы поставленное условие «знакоопределенности» было выполнено.

Величина a может быть функцией координаты и времени. Будем считать, что в (11) она получена осреднением по этим параметрам в центре каждого сеточного шаблона, выбор которого (направленность шаблона) определяется значениями a в самих точках сетки, где задана адвектируемая функция. Упомянутое уменьшение порядка аппроксимации производится изменением величины числа Куранта r.

Для случая $\frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x}$ меньше 1, можно доказать, что существует некое $\hat{r}$, меньшее 1, подстановка которого в (11) приводит к выполнению условия «знакоопределенности» схемы. Можно каждый раз не заниматься поиском этого нового $\hat{r}$, а просто при получении искомой функции вне интервала, задаваемого величинами ее минимума и максимума в трех противопотоковых точках шаблона, заменять ее значение на ближайшее из этих величин.

Остаются легко разрешимые проблемы с выбором направленности шаблонов при различных знаках скорости переноса a в соседних точках сетки или при серии подряд идущих нолей этой скорости и с очередностью расчета в ячейках сетки. Прежде всего, происходит расчет в точках сетки, где скорость переноса равна нулю, и в точках сетки, ограничивающих ячейки с расходом субстанции на обеих границах ячейки. Такая ячейка разбивается на две части с общей границей, где скорость переноса равна нулю. На этой границе функция считается неизменной в течение шага, что дает возможность произвести расчет в двух оставшихся граничных точках. Затем определяются значения неизвестной функции в остальных точках сетки на следующем временном уровне.

Если же $\frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x}$ оказалось больше 1, то переходим к другой аппроксимации уравнения (9), всегда удовлетворяющей условию «знакоопределенности»:

$$\frac{f_1^{\Delta t} - f_1^0}{\Delta t} + \frac{1}{r} a \frac{f_1^0 - f_0^0}{\Delta x} + (1 - \frac{1}{r}) a \frac{f_1^{\Delta t} - f_0^{\Delta t}}{\Delta x} = 0. \qquad (12)$$

Book_Gidromet.indb 73 13.01.2010 13:12:58

В случае аппроксимации уравнения (10) задача несколько усложняется. Во-первых, схема приобретает вид:

$$\frac{u_1^{\Delta t}-u_1^0}{\Delta t}+\frac{1+r}{4\cdot r}(u_0^0+u_1^0)\frac{u_1^0-u_0^0}{\Delta x}+\frac{r-1}{4\cdot r}(u_0^{\Delta t}+u_1^{\Delta t})\frac{u_1^{\Delta t}-u_0^{\Delta t}}{\Delta x}=0, \qquad (13)$$

так что неизвестное теперь является корнем квадратного уравнения. Величину r здесь будем определять как $\max\left\{\left|u_1^0\right|,\left|u_0^0\right|\right\}\cdot\frac{\Delta t}{\Delta x}$.

Если эта величина меньше единицы, то не сложно доказать, что существует некое $\hat{r}$, меньшее единицы, подстановка которого в (13) приводит к «знакоопределенности» схемы. Для этого достаточно взять максимум из трех величин $\hat{r}=\max\left\{0.134;r;\frac{(u_0^{\Delta t})^2-(u_0^0)^2}{(u_0^{\Delta t})^2+(u_0^0)^2}\right\}$.

Если величина r больше 1, то, как и в линейном случае, переходим к схеме, всегда «знакоопределенной»:

$$\frac{u_1^{\Delta t}-u_1^0}{\Delta t}+\frac{1}{2\cdot r}(u_0^0+u_1^0)\frac{u_1^0-u_0^0}{\Delta x}+(1-\frac{1}{r})\cdot 0{,}5\cdot(u_0^{\Delta t}+u_1^{\Delta t})\frac{u_1^{\Delta t}-u_0^{\Delta t}}{\Delta x}=0 \qquad (14)$$

Можно заметить, что выводы не слишком сильно изменились при переходе к квазилинейному случаю.

Отметим, что общая схема всей мезомасштабной модели суть схема предиктор-корректор. Делается полушаг по времени (куда входят все операторы линейной адвекции со скоростью переноса в (11) с начала шага), определяющий все функции системы в конце этого полушага, а затем полный шаг по времени, в котором линейный перенос происходит со скоростями, рассчитанными на полушаге. Аппроксимация же квазилинейных операторов на шаге и полушаге отличается только величиной Δt. Так как расположение узлов сетки различно на шаге и полушаге, то приходится делать дополнительное осреднение для получения величин на полушаге в нужных точках.

Кроме того, так как сетки для разных функций в принятой модели различны, то приходится проводить интерполяцию для определения составляющих скорости в точках сетки, где определена адвектируемая функция.

Несколько слов по поводу расчета выпадения осадков. Шаг по времени разностной схемы совершенно не подходит для разностной аппроксимации соответствующего этому процессу дифференциального уравнения в нижних сеточных слоях, где разрешение по верти-

Book_Gidromet.indb 74 13.01.2010 13:12:59

кали для них уменьшается в используемой модели до 2 м. Поэтому здесь применяется чисто Лагранжев подход, когда частицы осадков (раздельно капельные и кристаллические) данного атмосферного слоя с соответствующей им скоростью опускаются в течение шага по времени, сохраняя толщину этого слоя. Затем выделяются части этого опустившегося слоя, попавшие в нижележащие сеточные слои. Соответствующие этим частям массы суммируются и образуют массу осадков данного слоя. Часть исходного для данных осадков слоя, опустившаяся под поверхность входит в сумму накопленных осадков.

Перейдем к используемому в модели алгоритму описания процессов в почве и в возможно находящейся на ней смеси воды и льда.

Алгоритм расчета гидротермических свойств почвы

Выбранная для описания почвенных процессов система уравнений в основном взята из работы [3].

Расчетная область рассматриваемой мезомасштабной модели содержит кроме атмосферной части почвенную часть и дополнительный водный слой в виде лужи или льда или их смеси на поверхности почвы. Растительность представляется пленкой на этом слое или (при его отсутствии) на поверхности почвы. Тип растительности определяет отношение площади пленки к площади сеточной ячейки. Такой «лист» удерживает некоторое, также определяемое типом растительности количество воды, не допускает прямого взаимодействия нижележащей среды с атмосферой и испаряет через свои поры поставляемую корнями воду почвы. Так как наша основная задача — прогноз атмосферных параметров, мы ограничились довольно грубой физической постановкой задачи в этой части модели. Так, структура почвы считается независящей от направленной вверх координаты z и времени t; решение проблемы стока сводится к введению порога для толщины жидкой смеси; плотность льда ρ_i считается равной плотности воды ρ_w (тем самым исключается возможность разрушения пор почвы при замерзании содержащихся в них воды); используются довольно простые параметризации для коэффициентов решаемых уравнений, так что некоторые реально происходящие процессы просто выпадают из рассмотрения.

Гидротермический режим в указанной части модели определяется численным решением системы двух уравнений в частных производных (зависимость от горизонтальных координат (x, y) параметрическая) для двух функций: а именно для водности W (гипотетическая плотность воды в жидкой и кристаллической фазах при

Book_Gidromet.indb 75 13.01.2010 13:13:00

ее равномерном распределении по всему объему среды, в порах которой она расположена) и для суммы S энтропий компонентов рассматриваемой среды.

Слой почвы, охватываемый моделью, имеет заданную толщину и разбивается сеткой на фиксированные подслои различной толщины, каждый из которых может быть частично (или целиком) мерзлым. Водоем понимается как специфический вид почвы (без скелета и без потоков жидкой фазы воды). Специфика почвенной воды в том, что при отрицательной по Цельсию температуре эта вода не кристаллизуется, если ее количество меньше некоторой, определяемой данным видом почвы и с температурой величины $q_w^m(T)$.

Граница между талой и мерзлой частями среды в дальнейшем называется «фронтом». За каждым фронтом (если его температура $T = T_0 = 273{,}15K$) производится слежение при предварительном определении скорости его распространения из явно аппроксимируемых нижеприведенных соотношений. Как и в атмосферной части модели, сетка точек по вертикали фиксирована, а шаг по времени Δt постоянен. На таком фронте функция W считается непрерывной, тогда как энтропия может быть разрывной. В принципе, в любом сеточном интервале может возникнуть фронт, для каждого из которых решается задача, аналогичная задаче Стефана. Перемещаясь, фронты могут уничтожать друг друга.

На фронтах с $T < T_0$ (такие фронты возможны в почве при малой ее увлажненности) энтропия будет непрерывной вместе с жидкой составляющей водности. Такой фронт будут предполагаться неподвижным, а температура в точке фронта — неизменной, если температура и водность на границах слоя, содержащего этот фронт не меняются со временем. Положение такого фронта определено этим допущением (поток энтропии должен быть непрерывным в точке фронта) .

Там, где функция S (или производные функций S и W) рвутся, дифференциальные уравнения заменяются соотношениями на скачке. При этом предполагается, что разрыв расположен или в узле сетки, или внутри любого сеточного интервала. Внутри каждого сеточного интервала может находиться не более одного такого разрыва. В соответствии с этим предусмотрено 16 типов слоев, замкнутых относительно разрешенных скоростей перемещений фронтов (т.е. никаких новых типов слоев, кроме этих 16, при разрешенных перемещениях фронтов не образуется). На нижней границе почвы (на глубине 1,2 м) фиксируются (для 48 часового срока прогноза) климатическое значение положительной в шкале Цельсия температуры T

Book_Gidromet.indb 76 13.01.2010 13:13:00

и климатическое значение водности почвы, тогда как на нижней границе атмосферы ставятся условия баланса воды и энтропии на разделе двух сред. Последние условия в случае примыкания атмосферы к почве (но не к смеси) сводятся к непрерывности потоков влажности и энтропии. Используются приведенные ниже обозначения.

Безразмерные q_w и q_i — объемные водность и ледность почвы; $q_w^{\min} \le q_w \le q_w^{\max}$; $\rho_w = \rho_i$ — плотности воды и льда $q_w^m(T)$ — таблично задаваемая, монотонно возрастающая зависимость максимального объемного содержания жидкой фазы воды в мерзлой почве от температуры. При температуре $T \le T_0$ жидкая вода почвы переходит в кристаллическую фазу при температуре $T < T_0$, только если q_w больше $q_w^m(T)$. Величина W обозначает водность почвы (условная плотность конденсата воды во всех фазах при ее гипотетическом, равномерном распределении по объему почвы, часть пор которой она заполняет).

Выполнены следующие уравнения:

$$\partial W / \partial t = \partial \Pi_w / \partial z\,, \qquad (15)$$

где $W = \begin{cases} \rho_w & \text{— в смеси и в водоеме} \\ \rho_w \cdot q_w & \text{— в талой почве} \\ \rho_w \cdot q_w^f + W_i & \text{— в мерзлой почве} \end{cases}$

$W_i = \rho_w \cdot q_i;\ q_w^f \le q_w^m(T)\,;$

$\Pi w = \begin{cases} -\rho_w \cdot w & \text{— в смеси} \\ \rho_w \cdot K \cdot (\partial \psi / \partial z + 1) & \text{— в почве} \end{cases}$

Здесь w — вертикальная скорость частиц смеси, K — коэффициент гидравлической проводимости, ψ — капиллярно-сорбционный потенциал.

$$K = K^g \cdot \left(\frac{W - W_i}{W^{\max} - W_i} \right) \cdot (1 - \varphi \cdot \frac{W_i}{W_i^{\max}})^a;$$

$$\psi = \psi^g \cdot \left(\frac{W^{\max} - W_i}{W - W_i} \right)^b \cdot \left(\frac{W^{\max}}{W^{\max} - W_i} \right)^c.$$

где $W_I^{\max}$ — кристаллическая часть водности почвы при ее максимальном влагосодержании при данной температуре, а коэффициент φ — эмпирический. В некоторых моделях в формулу для коэффициента K вводят дополнительный множитель, переходящий в ноль при

Book_Gidromet.indb 77 13.01.2010 13:13:01

априорно задаваемой отрицательной в шкале Цельсия температуре, для прекращения потоков почвенной воды при температурах ниже этой температуры.

Постоянными для данного типа почвы принимаются величины $q_w^{\min}$, $q_w^{\max}$, $W^{\max}$; $W^{\min}$ (максимальная и минимальная водности), а также величины a, b, c, K^g, ψ^g и зависимость $q_w^m(T)$. Для Московского региона нами используется карта почв с выделением 10 почвенных типов.

Уравнение (15) действительно вне фронтов, а на фронте следует использовать соотношение, которое можно получить из соответствующего интегрального соотношения, связывающего величины W и Π_w через любую поверхность τ:

$$dz_\tau / dt \cdot \left[W\right] = -\left[\Pi_W\right], \tag{16}$$

где dz_τ / dt — скорость перемещения поверхности относительно среды по вертикали, а квадратные скобки от какой-либо величины — скачок этой величины (например, при переходе через поверхность τ сверху вниз).

Предполагается непрерывность W при переходе через фронт в смеси и в почве. Тогда из (16) следует непрерывность Π_w на фронте, что в смеси сводится к непрерывности на фронте скоростей жидкой воды и льда в предположении о равенстве их плотностей. Если τ — верхняя граница почвы, то $dz_\tau / dt = 0$ и, хотя здесь $\left[W\right]$ не ноль, выполнено $\left[\Pi_W\right] = 0$. На границе смеси с атмосферой dz_τ / dt может отличаться от 0.

Первое начало термодинамики запишем как уравнение энтропии, т.е. в среде без фронтов предполагается выполнение

$$\partial S / \partial t = \partial \Pi_S / \partial z, \tag{17}$$

где энтропия и ее поток задаются выражениями:

$$S = \begin{cases} \rho_w \cdot s_W \\ \rho_w \cdot s_I \\ \rho_g \cdot s_g + \rho_w \cdot q_W \cdot s_W + \rho_I \cdot q_I \cdot s_I \end{cases}, \qquad \Pi_S = \begin{cases} \dfrac{\lambda_W}{c_W} \cdot \dfrac{\partial s_W}{\partial z} - \rho_W \cdot w \cdot s_W \\ \dfrac{\lambda_I}{c_I} \cdot \dfrac{\partial s_I}{\partial z} - \rho_I \cdot w \cdot s_I \\ \dfrac{\lambda_g}{c_g} \cdot \dfrac{\partial s_g}{\partial z} + \Pi_W \cdot s_W \end{cases}.$$

Book_Gidromet.indb 78 13.01.2010 13:13:01

Первые две строчки формул определяют энтропию и ее поток для смеси (водоема) соответственно при положительных и отрицательных по Цельсию температурах, третья строчка — для энтропии и ее потока для почвы. При этом удельные энтропии почвы воды и льда определяем как:

$$s_g = c_g \cdot \ln(T / T_o);\ s_W = c_W \cdot \ln(T / T_o) + L_{IW} / T_o;\ s_I = c_I \cdot \ln(T / T_o).$$

Здесь L_{IW} удельная теплота плавления льда при $T = T_o = 273{,}15K$, w — скорость движения смеси; c_g, c_W, c_I — принимаемые постоянными удельные теплоемкости почвы, воды и льда, λ_W и λ_I — также принимаемые постоянными коэффициенты теплопроводности воды и льда. λ_g — зависящий от температуры и водности коэффициент теплопроводности почвы: в талой почве при $\log|\psi| < 3{,}1$ величина $\lambda_g = \lambda_g^m(q_W) = 418{,}68 \cdot \exp(-4{,}7 - \log|\psi|)$, а при $\log|\psi| \geq 3{,}1$ $\lambda_g = \lambda_g^m = 0{,}171548$.

Для мерзлой почвы $\lambda_g = \lambda_g^f = \lambda_g^m \left(\dfrac{W - W_I}{\rho_W} \right) \cdot (1 + W_I / \rho_I)$, где первая скобка после λ_g^m — функциональная.

Соотношение на скачке энтропии записывается аналогично (16):

$$dz_\tau / dt \cdot [S] = -[\Pi_S]. \qquad (18)$$

В почве $[S] = \dfrac{\rho_W \cdot L_{IW}}{T_o} \cdot [q_W];\ [\Pi_S] = \left[\lambda_g \cdot \dfrac{\partial(\ln(T / T_0))}{\partial z} \right].$

В водоеме или в смеси

$$[S] = \pm \frac{\rho_W \cdot L_{IW}}{T_o};\ [\Pi_S] = \left[\lambda_g \cdot \frac{\partial(\ln(T / T_0))}{\partial z} \right] - \rho_W \cdot w \cdot [S].$$

Энтропия рвется на фронте, если на фронте есть скачок жидкой фазы воды (что выполнено, если это фронт при $T = T_0$ и если $W / \rho_W > q_W^m(T_0)$). На границе почвы и смеси или почвы и атмосферы поток энтропии непрерывен (как и в случае водности), а на границе атмосферы со смесью энтропия рвется, возможно, вместе со своим потоком.

Для определения водности и температуры почвы используется разностная аппроксимация интегральных аналогов уравнений (15) и (17) с помощью консервативной схемы. В отсутствии фронтов эта

Book_Gidromet.indb 79 13.01.2010 13:13:02

схема переходит в обычную неявную трехточечную аппроксимацию первого порядка точности уравнений (15) и (17) на неравномерной сетке. Толщина дополнительного водного слоя на поверхности почвы меняется во времени (сам слой может возникать или исчезать), поэтому и интервалы интегрирования, включающие части этого слоя, переменны в течение шага по времени.

При аппроксимации интегралов по вертикали нужно знать, какую часть сеточного интервала занимает талая, а какую — мерзлая среда в начале и в конце шага по времени. При аппроксимации интегралов по времени от потоков воды и энтропии нужно знать, какую часть шага по времени середина сеточного интервала находится в талой, а какую — в мерзлой среде. Все четыре части определяются по начальному положению фронтов и (определяемым явной аппроксимацией (18)) начальным скоростям перемещений этих фронтов. Несколько сложнее рассмотрение потоков через среднюю линию дополнительного водного слоя на поверхности почвы, так как она сама может перемещаться из-за процессов фильтрации или из-за изменений толщины этого слоя при его взаимодействии с атмосферой. В конце шага по времени производится пересчет энтропии, обеспечивающий ее интегральное сохранение в нелинейной форме и стыковку предварительно полученных расположений фронтов с рассчитанными температурами.

Заключение

В заключение несколько слов о начальных данных, характеризующих состояние атмосферной и почвенной частей модели, и о задаваемых в течение всего срока прогноза в граничных точках (точки сетки на нижней границе почвы и на боковых и верхней границах атмосферной части модели) мезомодели краевых условиях.

В атмосферной части модели, кроме обычных для любой прогностической модели метеорологических величин температуры T, давления P, влажности q_v, составляющих скорости ветра u, v, w, нужны дополнительно поля водности облаков q_c и осадков q_r.

При построении этих полей привлекаются атмосферные статистики, а первым приближением для этих полей могут снова служить результаты фонового прогноза. В настоящее время для этой цели разрабатываются методики учета радиолокационных и спутниковых наблюдений.

Предполагается, что сеточное разрешение модели достаточно для прямого описания эволюции облаков и осадков при параметричес-

Book_Gidromet.indb 80 13.01.2010 13:13:03

ком описании как скорости падения частиц осадков, так и микрофизических взаимодействий частиц облаков и осадков.

В почвенной части мезомодели задаются начальные поля температуры T, и объемного влагосодержания q_w. Кроме этого, необходимы начальные значения толщины и температуры водного, возможно, разнофазного покрова почвы (снег, лужи).

Краевые условия в атмосферной части модели нужны для всех вышеуказанных метеорологических полей. Они рассчитываются с помощью величин, полученных интерполяцией результатов фонового прогноза в граничные и, возможно, приграничные точки пространственно-временной сетки мезомодели. На боковой границе почвенной части мезомодели ничего не задается, так как зависимость от горизонтальных координат считается параметрической. Проблема стока при этом решается предельно упрощенно: вводятся пороговые величины, как для объемного влагосодержания, так и для толщины слоя жидкой фазы воды на поверхности почвы. На нижней границе почвы на каждом шаге по времени задаются независящие от времени значения T и q_w.

Кроме вышеупомянутого, в точках сетки мезомодели должен быть задан ряд карт, таких как карты рельефа, растительного покрова, высоты уровня шероховатости, классификации почвы по типам и т.п.

Сведения о почвенных параметрах гораздо более скудны и могут приводить только к грубым оценкам распределений температуры и объемного водного содержания почвы. Пока что при оперативной деятельности здесь приходится ограничиваться интерполяцией между климатическими значениями на нижней границе почвенной области модели и реальными значениями температуры и влажности в атмосфере и температуры и фазового состава водного покрова поверхности. Результаты прогноза почвенных величин на срок построения начальных полей также могут использоваться в качестве первого приближения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Амбарцумян В.А.* Об одномерном случае задачи о рассеивающей и поглощающей среде конечной оптической толщины // Изв. АН Арм.ССР, 1944, № 1—2.
2. *Buzbee B.L., Golub G.H., Nielsen C.W.* On direct methods for solving Poisson's equations // SIAM J. Numer. Analysis, 1970, vol. 7. P. 627—655.
3. *Кучмент Л.С.* Модели процессов формирования речного стока Л.: Гидрометиздат, 1980. 144 с.

Book_Gidromet.indb 81 13.01.2010 13:13:04

Современные системы мезомасштабного прогноза погоды: состояние и перспективы

Г.С. Ривин
Гидрометцентр России

Введение

Как известно, еще в 1904 г. В. Бьеркнес указал, что для описания атмосферных процессов можно использовать систему 7 уравнений гидротермодинамики с 7 неизвестными:

- закон сохранения трехмерного момента (3 скалярных уравнения движения);
- закон сохранения массы сухого воздуха;
- уравнение состояния идеального газа;
- закон сохранения энергии;
- уравнения для сохранения влажности во всех ее фазах.

Эта система уравнений содержит в качестве своего решения не только медленные синоптические процессы, но и быстрые гравитационные и звуковые волны. Поэтому соответствующая конечно-разностная схема требует или небольшого шага по времени или исключения этих волн.

Например, если шаг сетки по горизонтали более 10 км, то можно в третьем скалярном уравнении движения (обозначения общепринятые)

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} - g + F_r + (2\Omega + \frac{u}{r\cos\varphi})u\cos\varphi + \frac{v^2}{r}$$

оставить только градиент давления и силу тяжести, т.е. перейти к гидростатическому приближению:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} = -g.$$

Так как остальные уравнения не упрощаются, то модель атмосферы, описываемая такой системой, принято называть *квазигидростатической*. Показано, что квазигидростатичность сохраняет правильное описание медленных атмосферных процессов, но позволяет устранить (отфильтровать) внутренние акустические волны и несколько исказить внутренние гравитационные волны, особенно распространяющиеся в горизонтальном направлении.

Book_Gidromet.indb Sec2:82 13.01.2010 13:13:04

В квазигидростатической модели атмосферы в качестве вертикальной координаты вместо высоты z обычно используют давление p (в этом случае уравнение неразрывности принимает вид, совпадающий с его видом для несжимаемой жидкости с вертикальной координатой z) или предложенную Н. Филлипсом безразмерную величину

$$\sigma = \frac{p}{p_{surf}},$$

где p_{surf} — давление на поверхности Земли. Использование σ в качестве вертикальной координаты позволяет более просто учесть орографию и соответствующее граничное условие.

Еще более полезно применение вместо σ близкой к ней предложенной Ф. Мезингером так же безразмерной величины η, равной

$$\eta = \sigma \frac{P_r(Z_s)}{P_r(0)} = \frac{p}{p_{surfr}} \frac{P_r(Z_s)}{P_r(0)} = \frac{p}{P_r(0)} \frac{P_r(Z_s)}{p_{surfr}},$$

где Z_s — высота расчетной поверхности модели атмосферы, $P_r(Z_s)$ — давление в стандартной атмосфере на высоте Z_s, $P_r(0) = 1013$ гПа. Применение вертикальной координаты η дает дополнительное спрямление расчетной поверхности за счет умножения σ на $\frac{P_r(Z_s)}{P_r(0)}$.

В последнее время наиболее широкое применение нашла гибридная вертикальная координата. В этом случае до некоторого вертикального уровня в качестве вертикальной координаты используется σ или η, а выше — давление.

Если шаг сетки по горизонтали менее 10 км, то третье скалярное уравнение движения необходимо использовать без упрощений, в этом общем случае модель атмосферы принято называть *негидростатической*. Современные системы оперативного мезомасштабного прогноза погоды используют негидростатические модели атмосферы, в то время как системы оперативного глобального прогноза погоды пока в основном используют квазигидростатические модели атмосферы.

Великолепное описание современных (разработанных до 2002 г.) методов моделирования атмосферных процессов, методов усвоения метеорологических данных и исследований по проблеме предсказуемости дано в книге Е. Калнай [8]. Особая ценность книги состоит в том, что в ней отражен колоссальный опыт по развитию и применению соответствующих методов как автора, так и возглавляемого ею в течение с 1987 по 1997 гг. коллектива Центра моделирования окружающей среды (EMC, ранее — Отдел развития),

Book_Gidromet.indb Sec2:83 13.01.2010 13:13:05

входящего в состав Национальных центров прогноза окружающей среды (NCEP, ранее Национальный метеорологический центр) Метеослужбы США. Изложение материала книги основано на ее опыте преподавания по тематике книги в университетах штатов Оклахомы (1998—1999 гг.) и Мериленда (с 1999 г.), что дополнительно положительно повлияло как на содержание, так и на методику описания современных методов.

Недостатком книги является крайне незначительное описание результатов советских и российских исследований по данной тематике. Соответствующие результаты советских и российских исследований можно найти в книгах Г.И. Марчука [3—5], В.П. Дымникова [2] и Ф.В. Должанского [1] и в литературе, приведенной в этих книгах.

Современные системы оперативного прогноза погоды состоят из 6 полностью равноправных подсистем:

1. наблюдательная подсистема;
2. телекоммуникационная подсистема;
3. вычислительная подсистема;
4. подсистема усвоения данных;
5. подсистема моделирования процессов в атмосфере, почве и океане;
6. подсистема постпроцессинга.

Подчеркнем, что плохая работа или плохое использование любой из этих подсистем ухудшает качество прогноза погоды, даже если идеально работают все остальные подсистемы. В этом смысле и понимается полноправность каждой из подсистем.

Так как главное внимание в данной работе посвящено мезомасштабным процессам в атмосфере, то вначале напомним, что к ним относятся процессы с горизонтальным масштабом от 2 до 2000 км.

В литературе можно встретить выделение трех подгрупп мезомасштабных процессов:

1. α-мезомасштаб (200—2000 км);
2. β-мезомасштаб (20—200 км);
3. γ-мезомасштаб (2—20 км).

Для описания волны требуется интервал, не менее 4 шагов сетки. Поэтому, строго говоря, к α-мезомасштабным моделям атмосферы можно отнести модели с шагами сетки не более 50 км, к β-мезомасштабным моделям атмосферы — с шагами сетки не более 5 км и, наконец, γ-мезомасштабным моделям атмосферы — с шагами сетки не более 500 м.

Book_Gidromet.indb Sec2:84 13.01.2010 13:13:05

Современные системы оперативного мезомасштабного прогноза погоды основываются на работе совместно с системой глобального прогноза погоды. А именно, подсистема глобального моделирования процессов в атмосфере, почве и океане должна поставлять начальные и прогностические данные на боковых границах области мезомасштабного прогноза и поле начального приближения для восстановления начального поля по данным наблюдения, если не существует соответствующая подсистема усвоения данных.

В данном обзоре будут рассмотрены современные европейские мезомасштабные системы оперативного в основном сверхкраткосрочного (в интервале времени 0—12 часов) и краткосрочного (в интервале времени 12—72 часа) прогнозов погоды. При этом главное внимание будет обращено на описание компонента «модель атмосферы», входящего в состав подсистемы усвоения данных и подсистемы моделирования процессов в атмосфере, почве и океане. Так как для задания начальных и боковых граничных данных используются системы прогноза глобальной погоды, то будет предварительно дана краткая информация об этих системах.

Современные системы оперативного глобального прогноза погоды

Приведем информацию об основных характеристиках современных оперативных систем прогноза глобальной и региональной погоды для ведущих метеорологических центров (информацию о предшествующем состоянии можно найти в [6, 9]).

Эта информация в большинстве своем основана на таблицах WGNE (Working Group for Numerical Experiments — Рабочая группа по численным экспериментам), ежегодно подготавливаемых D. Maejewski (DWD (Deutsche Wetter Dienst) — Метеорологическая служба Германии), и на официальных сведениях национальных метеослужб, предоставленных ВМО в начале 2007 г. (в США — по состоянию на январь 2006 г., так как последний представленный ВМО и расположенный на сайте ВМО отчет метеослужбы США — за 2005 г.). Для понимания динамики развития оперативных систем прогноза погоды информация приводится на начало 2006 и 2007 гг.

В таблицах 1 и 2 для ведущих метеорологических центров приведены основные характеристики оперативных глобальных и региональных моделей атмосферы по состоянию на январь 2006 г. и 2007 г., ансамблей прогнозов и используемых вычислительных систем.

Book_Gidromet.indb Sec2:85 13.01.2010 13:13:06

Для моделей атмосферы указаны:

- тип схемы (T_L — спектральная с треугольным разложением с указанием количества используемых членов разложения, КР — конечно-разностная);
- названия для некоторых моделей;
- количество L используемых вертикальных уровней;
- шаг сетки по горизонтали;
- количество членов ансамбля прогнозов;
- вычислительная система.

В основном все глобальные модели являются квазигидростатическими.

Таблица 1

Свойства оперативных глобальных моделей атмосферы (январь 2006 г.)

Страна, система или модель	ПРОГНОЗ: схема, количество уровней; шаг сетки, заблаговременность прогноза (сутки)	АНСАМБЛЬ: схема, количество уровней; количество членов ансамбля, шаг сетки, заблаговременность прогноза (сутки)	Вычислительная система, состав, пиковая производительность (Тфлопс)
ECMWF, IFS	TL511 L60; 40 км, 10	TL255 L40; 51, 80 км, 10	IBM p690, 2×68 узлов, 20
Великобритания, UM	КР, L50; 40 км, 6	L38; 24, 90 км, 3	NEC SX6, 34 узла; NEC SX8 16 узлов, 4
Германия, GME	КР, L40; 40 км, 7	-------	IBM p575; 2×52 узлов, 2×3.1
Россия, СМ	T85 L31; 150 км, 10	-------	Itanium 4x4; 0.1
США, AVP	T382 L64; 52, (00-7.5) T190 L64; 104, (7.5-16)	T126 L28; 45,16	IBM p655 (Cluster 1600), 7,8
Франция, ARPEGE/ ALADIN	TL358 L41; 23-133, 3	TL358 L41; 11, 2.5	Fujitsu VPP5000, 1,2
Япония GSM	TL319 L40; 9	T106 L40; 25, 9	Hitachi SR8000-E1, 80 узлов, 0,8

Book_Gidromet.indb Sec2:86 13.01.2010 13:13:06

Таблица 2

Свойства оперативных глобальных моделей атмосферы (на январь 2007 г., в США на январь 2006 г.)

Страна, система или модель	ПРОГНОЗ: схема, количество уровней; шаг сетки, заблаговременность прогноза (сутки)	АНСАМБЛЬ: схема, количество уровней; количество членов ансамбля, шаг сетки, заблаговременность прогноза (сутки)	Вычислительная система, состав, пиковая производительность (Тфлопс)
ECMWF, IFS	TL799 L91; 25 км, 10	TL399 L62; 51; 50 км, 00-10, TL255 L62; 51; 60 км, 11—15	IBM p690, 2×68 узлов, 20
Великобритания, UM	KP, L50; 40 км, 6	L38; 24; 90 км, 15	NEC SX6, 34 узла; NEC SX8, 16 узлов, 4
Германия, GME	KP, L40; 40 км, 7	-------	IBM p690; 2×52 узлов, 2×3.1
Россия, СМ	T85 L31, 150 км, 10	-------	Itanium, 4×4; 0,1
США, AVP	T382 L64; 52 км, 00-07 T190 L64; 104 км, 07-16	T126 L28, 45; 160 км, 16	IBM p655 (Cluster 1600), 7,8
Франция, ARPEGE/ ALADIN	TL358 L41; 23—133 км, 0-4 TL511 L60; 40 км, 4—7	TL358 L41, 11; 23—133 км; 2,5	Fujitsu VPP5000, 31 процессор, 1,2
Япония GSM	TL319 L40; 56 км, 9	T159 L40; 51; 112 км, 9	HITACHI SR11000/K1, 2×80 узлов×16 процессоров, 21

Первой оперативной негидростатической глобальной моделью стала модель Гидрометеослужбы Великобритании UM L30 (Unified Model — унифицированная модель — оперативное использование с 7 августа 2002 г.).

Отметим, что в таблице 2 модель атмосферы метеослужбы США названа GFS, в то время как эта же модель в таблице 1 названа AVP (AVP). Кроме того, в этой же таблице при описании системы гидрометслужбы Франции использовано сокращение IFS (EC), что означает

Book_Gidromet.indb Sec2:87 13.01.2010 13:13:07

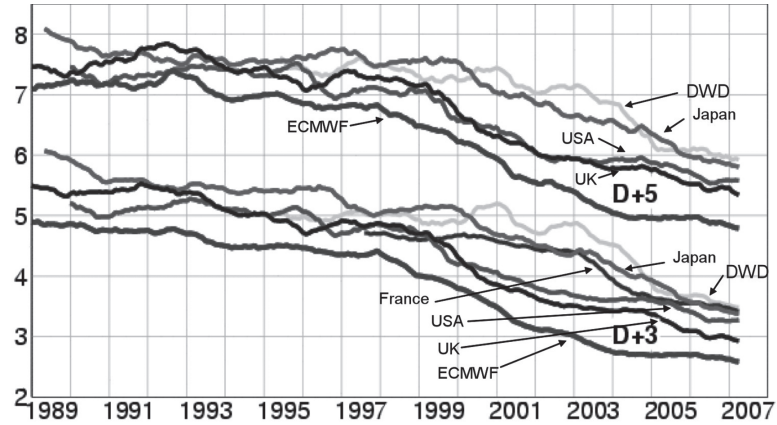


Рис. 1. Осредненные среднеквадратические ошибки прогноза на 3 и 5 суток поля давления для внетропической зоны Северного полушария на уровне моря для глобальных моделей различных метеослужб (DWD — Метеослужба Германии, ECMWF — Европейский центр среднесрочных прогнозов, France — Метеослужба Франции, Japan — Метеослужба Японии), UK — Метеослужба Великобритании, USA — Метеослужба США.

«система IFS, разработанная в ECMWF». Также отметим, что в большинстве стран для прогноза на весь период используется одна и та же модель в отличие от метеослужб США и Франции.

В США для начального периода (0—7 суток), использована спектральная модель GFS с шагом сетки 52 км, а для заключительного периода (7—16 суток) — та же модель атмосферы, но с шагом 104 км. Во Франции для начального периода (0—4 суток) использована модель ARPEGE с переменным шагом сетки, равным 23 км над территорией Франции и 133 км над территорией Новой Зеландии. Для заключительного же периода (4—7 суток) использована просто система IFS ECMWF с шагом сетки примерно 40 км.

Из приведенных таблиц видно, что уже к январю 2007 г. шаг сетки глобальных моделей ведущих метеорологических центров стал равным 25—50 км. Так как мезомасштабные модели должны иметь шаги сетки в несколько раз меньшие, чем глобальные, то шаг сетки региональной модели должен составлять порядка 7—20 км.

Для сравнения качества прогнозов глобальных моделей атмосферы для ведущих метеорологических центров на рис. 1 приведены осредненные среднеквадратические ошибки прогноза полей давления на уровне моря за период 1989—2007 гг. Этот рисунок взят из матери-

Book_Gidromet.indb Sec2:88 13.01.2010 13:13:07

алов сессии 1.9 Рабочей группы по численным прогнозам (WGNE — Work Group for Numerical Experiments), Шанхай, октябрь 2007 г.

Рисунок показывает улучшение качества прогнозов с течением времени (особенно гидрометеослужбы Великобритании, уступающей только ECMWF), причем по-прежнему наиболее удачные прогнозы дает ECMWF. Из рисунка видно, что и в 2007 г. качество прогнозов ECMWF по-прежнему лучше (особенно прогноз на 5 суток), но на второе место по качеству прогнозов вышла Метеослужба Великобритании, оттеснив Метеослужбу США. Качество прогнозов остальных метеослужб, включая США, довольно близкое.

Современные системы оперативного мезомасштабного прогноза погоды

В настоящее время в Европе метеослужбы разделились на несколько групп для эксплуатации и усовершенствования оперативных систем мезомасштабного прогноза погоды:

– ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International) — основой являются разработки метеослужбы Франции; внутри группы ALADIN страны центральной Европы (Австрия, Венгрия, Румыния, Словакия, Словения, Чешская республика, Хорватия) создали подгруппу LACE (Limited Area modelling in Central Europe) с региональным центром в Праге [11];

– COSMO (COnsortium for Small-scale MOdelling) — основой являются разработки метеослужбы Германии [7, 12];

– HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) — основой являются совместные разработки метеослужб скандинавских стран и Испании, при этом с самого начала создания этой группы Франция принимает участие на уровне научных разработок [10, 13].

На рис. 2 с помощью различных оттенков серого цвета показаны эти группы. Отметим, что хотя метеослужба Великобритании [14] не входит ни в одну из групп и проводит свои разработки совместно с университетами своей страны, но участвует в ряде европейских проектов. В то же время две страны (Польша, Румыния) входят одновременно в группы ALADIN и COSMO.

В 2007 г. Роскомгидромет вошел в состав группы COSMO и с сентября 2007 г. принимает активное участие в работе этой группы по развитию и совершенствованию модели COSMO.

Отметим, что в настоящее время существуют попытки более тесного взаимодействия всех этих групп на основе различных проектов Евро-

Book_Gidromet.indb Sec2:89 13.01.2010 13:13:08

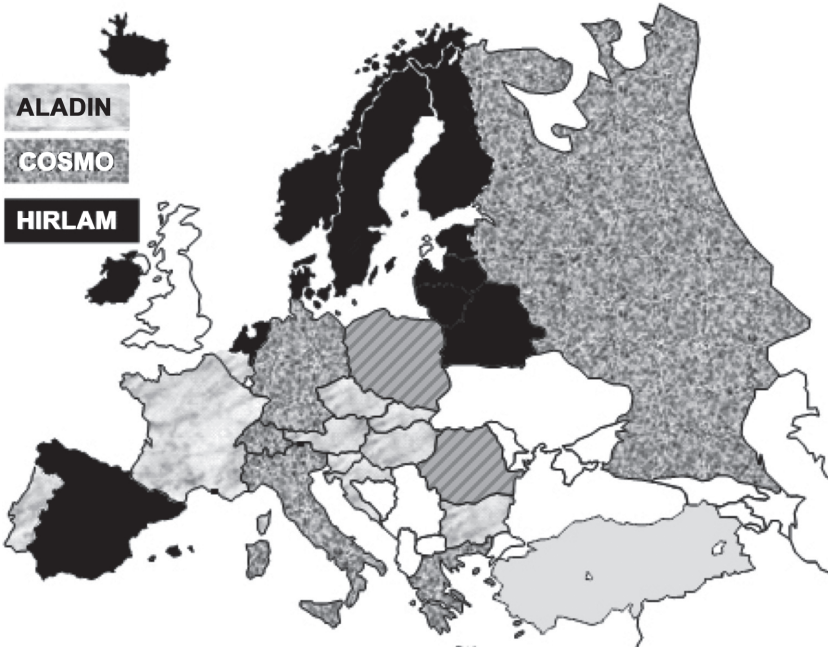


Рис. 2. Европейский метеорологический ландшафт.

пейского союза, пока в основном на уровне обмена опытом и информацией, хотя проект HARMONIE (HIRLAM-ALADIN Research on Mesoscale Operational NWP In Euromed) объединяет усилия стран-участниц HIRLAM, ALADIN и LACE для моделирования с высоким разрешением.

В таблице 3 приведены характеристики оперативных региональных моделей атмосферы для ведущих метеорологических центров в основном по состоянию на начало 2007 г. Эта информация основана на отчетах за 2006 г., представленных соответствующими гидрометеослужбами в ВМО. Исключением является информация об оперативных региональных моделях атмосферы США, так как последний отчет, находящийся на сайте ВМО, содержит информацию для 2005 г. (информация о планируемой замене ETA на NMM взята из этого же отчета).

Из таблицы видно, что шаг сетки для мезомасштабных моделей в начале 2007 г. в основном составлял 2—15 км.

В основном, региональные модели с шагом сетки более 10 км являются квазигидростатическими. Следует отметить, что первой в мире оперативной негидростатической моделью является модель

Book_Gidromet.indb Sec2:90 13.01.2010 13:13:08

Таблица 3

Характеристики оперативных региональных моделей атмосферы на начало 2007 г.

Страна	Боковые и начальные условия	Модель	Шаг сетки, км
HIRLAM	ISF	HIRLAM	5—20
Великобритания	UM	NAE L38 UK L708	12 4
Россия	GFS	L31 MM5 Z-модель	75 15 10
США	GFS	NAM (прежде ETA) L60 NMM L60	12 5—8
Франция	ARPEGE/ ALADIN	AROME L41 Прогноз для территории Франции на 30 ч (оперативное применение в конце 2008 г.)	2,5
Германия	GME COSMO-EU	COSMO-EU L40 COSMO-DE L50 (оперативно с 01.04.2007)	7 2,8
Швейцария	ISF	COSMO-7 L60 COSMO-2 L60 (оперативный прогноз на 24 ч с 02.08.2008)	6,6 2,2
Япония	GSM RSM	RSM L40 MSM L50	20 5

COSMO-EU (ранее LM — Lokal-Modell) Гидрометеослужбы Германии, которая оперативно используется с 1 декабря 1999 г.

Следует отметить, что в настоящее время большинство негидростатических моделей являются многоцелевыми. С их помощью можно моделировать разнообразные процессы, проводить прогноз погоды, исследовать климат, при этом осуществлять прямое моделирование части процессов (например, конвекции) без дополнительной параметризации.

В настоящее время 2 раза в день (00 и 12 UTC) Гидрометцентр России получает по FTP из Оффенбаха данные глобального прогноза по модели GME с трехчасовыми интервалами, необходимые для задания начальных и боковых условий для Европейской части

Book_Gidromet.indb Sec2:91 13.01.2010 13:13:08

России (сетка 168×300×40 с шагом 14 км). По этим данным по модели COSMO-RU дается прогноз на 78 ч. Время счета — 3 ч 35 мин. при применении 8 ядер с декартовой топологией 1x8. Результаты расчетов записываются в базу данных.

Расчеты на суперкомпьютере Altix Itanium с 256 ядрами позволили выбрать эффективный вариант для приведенной выше сетки. Таким оказался 8×32=256 по сравнению с 16×16=256 или 4×64=64. В этом случае (8×32 для MPI) 78-часовой прогноз потребовал 311 сек. (5 мин. 11 сек.).

В дальнейшем по получении нового суперкомпьютера предполагается перенести систему на него и подготовить вариант для Европейской части России с шагом сетки 7 км и некоторых ее частей с шагом 2,8 км.

Подробная информация о других моделях, используемых в Гидрометцентре России, приведена в соответствующих статьях данного сборника.

Заключение

В таком кратком обзоре невозможно осветить все свойства современных систем прогноза погоды. В частности, совершенно не затронуты используемые численные методы, используемое описание физических процессов в атмосфере, ансамбли прогнозов. Желающим ознакомиться с этими и другими вопросами можно рекомендовать литературу, указанную в списке.

Текст статьи был представлен в виде доклада на научной школе-семинаре «Современные технологии прогнозирования погоды» (6—10 октября 2008 года, Москва, Россия). За прошедший после этого год произошло несколько важных событий: Росгидромет стал полноправным членом консорциума COSMO, вошел в строй суперкомпьютер ММЦ, адаптирована к суперкомпьютеру модель атмосферы COSMO-RU, разработана соответствующая технологическая линия для оперативной системы прогноза. С сентября 2009 г. на суперкомпьютере с использованием 1024 ядер для проведения параллельных вычислений ежедневно 2 раза в сутки в оперативном режиме проводятся экспериментальные прогнозы на 78 часов с шагом сетки 7 км для области примерно 4900×4340 км (от Франции до Новосибирской области). Подробнее часть этой работы и планы работ ведущих метеоцентров мира на ближайшие 2 года описаны в статье Вильфанда Р.М., Ривина Г.С. и Розинкиной И.А. «Мезомасштабный краткосрочный региональный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU» (Метеорология и гидрология, 2010, № 1, с. 5—17).

Book_Gidromet.indb Sec2:92 13.01.2010 13:13:09

В ближайшие 10 лет можно ожидать усиления работы ведущих метеорологических организаций в следующих направлениях, связанных с улучшением качества прогноза погоды [8]:

- развитие адаптивных наблюдательных систем, в которых дополнительные наблюдения будут проводиться в местах, влияющих на быстрый рост ошибки в ансамблях;
- усовершенствование методов усвоения данных с максимальным использованием данных, особенно спутниковых и радарных;
- развитие детального краткосрочного прогноза погоды с прогнозом опасных явлений погоды на сетке 1 км и менее;
- создание совместных атмосферно-гидрологических систем, в которых атмосферные осадки используются для оценки потоков воды в реках, особенно важных для среднесрочного прогноза наводнений;
- развитие более детальных совместных моделей «*Атмосфера — океан — суша*» для увеличения срока прогноза до 2 недель и расширения прогностических величин за счет оценки переноса различных типов загрязняющих веществ в воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Должанский Ф.В.* Лекции по геофизической гидродинамике. М.: ИВМ РАН, 2006. 378 с.
2. *Дымников В.П.* Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М.: ИВМ РАН, 2007. 283 с.
3. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. 320 с.
4. *Марчук Г.И.* Методы расщепления. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 264 с.
5. *Марчук Г.И.* Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. 336 с.
6. *Ривин Г.С.* Современные вычислительные технологии в задачах прогноза погоды // Вычислительные технологии, 2004, т. 9. С. 133—138.
7. *Doms G., Shaettler.* A description of the Nonhydrostatic Regional Model LM. Part. I: Dynamics and Numerics. Offenbach: Deutscher Wetterdienst. 2002. 134 p.
8. *Kalnay E.*. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambrigde University press. 2003. 341 p.
9. *Rivin G.S.* Modern computational technologies for the estimation of atmospheric processes on regional scales // Air Pollution Processes in Regional Scales. 2003. NATO Science Series, IV. Earth and Enviromental Sciencies. V. 30. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London. P. 241—248.
10. *Unden P., Rontu L., Jarvinen H.* et al. HIRLAM-5 Scientific Documentation. Norrkoeping: SMHI. 2002. 143 p.
11. http://cnrm.meteo.france/aladin/
12. http://www.cosmo-model.org/
13. http://hirlam.org/
14. http://www.metoffice.gov.uk/

Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM

Н.Ф. Вельтищев, В.Д. Жупанов
Гидрометцентр России

Дано краткое описание негидростатических моделей общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM, разработанных в NCAR и NCEP США, соответственно. Изложены результаты оценки краткосрочного прогнозирования сильных осадков ($P \geq 10$ мм/12 ч) и сильных ветров на высоте 10 м ($V \geq 10$ м/с) с помощью этих моделей при их интегрировании на сетках с шагом 3 км и прямым моделированием глубокой конвекции. Прогнозы оценивались над центром Европейской территории России по радиолокационным и станционным измерениям летом 2008 г. Получено, что обе модели достаточно хорошо воспроизводят мезомасштабные конвективные системы и связанные с ними области сильных осадков и ветров, но имеют общие недостатки: переоценивают количество и площадь сильных осадков и недооценивают скорость сильных ветров. В меньшей степени эти недостатки свойственны модели ARW. Обсуждаются возможные причины систематических ошибок в прогнозах.

1. Введение

Модели WRF-ARW и WRF-NMM разработаны в США. Здесь WRF является общим для обеих моделей сокращением от Weather Research and Forecasting. Вторые составляющие этих сокращенных названий моделей обозначают их различные динамические ядра. ARW — сокращение от Advanced Research WRF, это динамическое ядро было разработано в NCAR (National Center for Atmospheric Research). NMM является сокращением от Nonhydrostatic Mesoscale Model, это динамическое ядро было разработано в NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Предполагается, что в будущем это будет единая прогностическая система, в которой можно будет обращаться к различным динамическим ядрам (ARW или NMM) и к общему набору параметризаций. В настоящее время обе модели представляют собой по существу отдельные прогностические системы, требующие самостоятельной процедуры установки, хотя в них имеется достаточно много общих элементов.

Book_Gidromet.indb Sec1:94 13.01.2010 13:13:10

Обе системы являются моделями общего пользования, т.е. их коды могут быть получены обращением к соответствующим сайтам NCAR или NCEP.

Модель WRF-ARW начала эксплуатироваться в NCEP с ноября 2004 г., а модель WRF-NMM — с июня 2006 г.

В Гидрометцентре России эксперименты по составлению прогнозов с помощью модели WRF-ARW начались в 2007 г., а с использованием модели ARW-NMM — в 2009 г. Основная цель этих экспериментов состояла в том, чтобы оценить возможности использования моделей в целях краткосрочного прогноза опасных явлений погоды (сильных осадков и ветров, града), связанных с интенсивными мезомасштабными системами циркуляции: мезомасштабными конвективными комплексами, линиями шквалов и атмосферными фронтами.

Ниже будет дано краткое описание обеих моделей и некоторых результатов их опытной эксплуатации в летние сезоны 2007—2009 гг.

2. Модели общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM

В качестве материнских моделей для получения начальных данных (или полей первого приближения) и данных на границах на срок прогноза могут быть использованы (и используются) различные глобальные и региональные модели. К информации из этих моделей предъявляется всего два требования: выходная прогностическая продукция моделей должна содержать все переменные, требуемые для инициализации моделей WRF, и быть представленной в коде ГРИБ.

2.1. Динамическое ядро модели ARW

2.1.1. Исходные уравнения

Основное отличие модели WRF от модели MM5 состоит в том, что в ней используется несколько отличная вертикальная координата, примененная впервые в работе Лаприза [38], исходя из предложения Касахары [33] относительно возможности записи уравнения сохранения массы в дивергентной форме при наложении на вертикальную координату определенных ограничений. В оригинальной работе Лаприза она была названа координатой π. Эта координата приводит уравнение сохранения массы к дивергентному виду, что заметно упрощает запись уравнений движения в дивергентной

Book_Gidromet.indb Sec1:95 13.01.2010 13:13:10

(потоковой) форме. Эта координата обладает замечательным свойством:

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = -\rho g\,, \tag{1}$$

т.е. имеет точно такую же зависимость от высоты, как и гидростатическое давление p_h.

Модель ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты η, которая напоминает сигма-координату, но отличается от нее тем, что она определяется не через полное давление p, а через его гидростатическую составляющую p_h:

$$\eta = \left(p_h - p_{ht}\right)/\mu, \quad \mu = p_{hs} - p_{ht}\,, \tag{2}$$

где p_{hs} и p_{ht} — гидростатическое давление на нижней и верхней границах области, соответственно.

С подробным выводом системы исходных уравнений ARW можно познакомиться в работах Клемпа и др. [36], Скамароха и др. [68]. Здесь будет приведена окончательная форма уравнений, которые затем дискретизируются:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + m\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(Uu\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(Vu\right)\right] + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\Omega u\right) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \overline{p}}{\partial x}\right) + \\ + \left(\alpha/\alpha_d\right)\left(\mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta}\frac{\partial \Phi}{\partial x} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right) = F_U\,, \tag{3}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + m\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(Uv\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(Vv\right)\right] + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\Omega v\right) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial y} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \overline{p}}{\partial y}\right) + \\ + \left(\alpha/\alpha_d\right)\left(\mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta}\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) = F_V\,, \tag{4}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + m\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(Uw\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(Vw\right)\right] + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\Omega w\right) - \\ - \frac{g}{m}\left(\alpha/\alpha_d\right)\left[\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \overline{\mu}_d\left(q_v + q_c + q_r\right)\right] + \frac{g}{m}\mu'_d = F_W\,, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial t} + \frac{1}{\mu_d}\left[m^2\left(U\frac{\partial \Phi}{\partial x} + V\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) + m\Omega\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} - gW\right] = 0\,, \tag{6}$$

Book_Gidromet.indb Sec1:96 13.01.2010 13:13:10

$$\frac{\partial \mu'_d}{\partial t} + m^2\left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}\right] + m\frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0, \tag{7}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + m^2\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(U\theta\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(V\theta\right)\right] + m\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\Omega\theta\right) = F_\Theta, \tag{8}$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m^2\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(Uq_m\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(Vq_m\right)\right] + m\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\Omega q_m\right) = F_{Q_m}. \tag{9}$$

Эти прогностические уравнения дополняются диагностическими, вытекающими из гидростатичности вертикальной координаты:

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \eta} = -\bar{\mu}\bar{\alpha}, \tag{10}$$

представляющей собой уравнение гидростатики, и уравнением для возмущений:

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial \eta} = -\bar{\mu}\alpha' - \mu'\alpha, \tag{11}$$

а также уравнением состояния.

В системе (3) — (11) использованы следующие обозначения:

u, v и w — компоненты скорости,

$U = \mu_d u / m, \quad V = \mu_d v / m, \quad \Omega = \mu_d \dot{\eta} / m,$

где μ_d определяет массу сухого воздуха в столбе, т.к. орографическая координата η в (2) определяется относительно сухого воздуха, m — масштабный множитель карты, $\dot{\eta}$ — вертикальная скорость в орографических координатах.

α — удельный объем, содержащий помимо сухого воздуха водяной пар и гидрометеоры: $\alpha = \alpha_d\left(1 + q_v + q_c + q_r + q_i + \ldots\right)^{-1}$, где q_* — отношения смеси водяного пара, облачности, дождя, льда и т.д.

$\alpha_d = \left(1/\rho_d\right)$ — удельный объем сухого воздуха.

Термодинамические переменные представлены в виде суммы возмущений и фонового гидростатического значения:

$$p = \bar{p}\left(z\right) + p', \quad \Phi = \bar{\Phi}\left(z\right) + \Phi', \quad \mu_d = \bar{\mu}_d\left(x, y\right) + \mu'_d.$$

Здесь p — давление, Φ — геопотенциал. Так как координатные поверхности η не горизонтальны, то $\bar{p}$, $\bar{\Phi}$ и $\bar{\alpha}$ являются функциями x, y и η, но это не принимается во внимание.

$\Theta = \mu_d\theta_m$, где $\theta_m = \theta\left(1 + 1{,}61q_v\right)$ — потенциальная температура,

$Q_m = \mu_d q_m$, $q_m = q_v, q_c, q_r, q_i, \ldots$

Источники (стоки) в уравнениях (3) — (9) F_* даны в общем виде.

Book_Gidromet.indb Sec1:97 13.01.2010 13:13:11

Отличительная особенность исходной системы ARW состоит в том, что прогностические уравнения (кроме уравнения (6)) написаны в дивергентной (консервативной) форме. Уравнение (6) тоже можно было написать в консервативной форме, но авторы этого не сделали, так как $\mu\Phi$ не является консервативной переменной. Можно было бы также использовать прогностическое уравнение для давления вместо уравнения (6), как это сделано в модели MM5 и в работе Лаприза [38], но давление — не сохраняемая переменная, и авторы не могли использовать уравнение для давления и уравнение для Θ в консервативной форме, потому что они линейно зависимы. Кроме этого, прогностическое уравнение для давления имеет член с дивергенцией, умноженный на большой коэффициент (пропорциональный скорости звука), который затрудняет дискретизацию по времени и пространству.

2.1.2. Метод численного решения

Расчеты в модели ARW производятся в параллелепипеде, основание которого касается сферической Земли, а оси декартовых координат в точке касания ориентированы по меридиану и кругу широты. Расчеты могут производиться на серии вложенных сеток. Вложения могут выполняться только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов должна быть одинаковой на всех сетках. Вложения должны быть ориентированы точно так же, как и материнская сетка и, наконец, шаг каждой дочерней сетки должен быть в целое число раз меньше, чем шаг родительской сетки. Имеется также возможность решения задачи на подвижной сетке.

Так же, как и в модели MM5, в ARW используется подход с расщеплением по времени. Медленные или низкочастотные моды, связанные с процессом переноса, интегрируются с использованием схемы Рунге-Кутта третьего порядка по времени (РК3), а высокочастотные акустические моды, связанные с процессом адаптации полей давления и скорости, интегрируются с меньшим шагом по времени для сохранения вычислительной устойчивости.

Интегрирование с расщеплением по времени аналогично предложенному в работе Клемпа и Вильхельмсона [35]. Схема РК3 с расщеплением по времени описана в общем виде в работе Викера и Скамароха [79]. В ARW она модифицирована применительно к этакоординате и потоковой форме уравнений, а также с учетом записи переменных в форме возмущений для акустического компонента

Book_Gidromet.indb Sec1:98 13.01.2010 13:13:12

при расщеплении по времени. Интегрирование акустической моды сделано в виде коррекции к интегрированию методом Рунге-Кутта. Процедура интегрирования на малом («акустическом») шаге по времени довольно подробно изложена в работах Клемпа и др. [36], Викера и Скамароха [79] и Скамароха и др. [68]. Для пространственной дискретизации используется сетка С по классификации Аракавы.

2.2. Динамическое ядро NMM

2.2.1. Исходные уравнения

Основное отличие исходной системы, используемой в NMM, состоит в том, что в этой модели отделены члены, присутствующие в гидростатических моделях, от членов, возникающих вследствие учета негидростатичности. В гидростатических орографических координатах сигма, которые тождественны принятым в модели ARW, условие негидростатичности (наличие вертикальных ускорений в уравнении движения для вертикальной скорости w) имеет вид

$$\frac{dw}{dt} = g\left(\frac{\partial p}{\partial \pi} - 1\right), \tag{12}$$

где π — массовая координата, обсуждавшаяся уже в 2.1.1. Величина

$$\varepsilon = \frac{1}{g}\frac{dw}{dt}, \tag{13}$$

характеризующая отношение вертикального ускорения к силе тяжести и выступающая в виде отдельного члена или в качестве множителя в исходных уравнениях NMM, определяет негидростатическую часть модели. При $\varepsilon = 0$ система уравнений становится гидростатической. Естественно, что степень негидростатичности возрастает по мере увеличения вертикальных ускорений (параметра ε).

В отличие от ARW, не существует развернутого описания модели NMM (во всяком случае оно не известно авторам настоящей статьи). Источниками информации служили работы Янича [26, 29] и его лекция [28], представленная на учебном семинаре по WRF-NMM в августе 2006 г. Блэком, а также Руководство по NMM [76]. Не останавливаясь на выводе исходной системы, который можно найти частично в цитировавшихся выше работах, выпишем ее в окончательном виде без членов, описывающих источники (стоки)

Book_Gidromet.indb Sec1:99 13.01.2010 13:13:12

в уравнениях движения и притока тепла. Опустим также уравнения переноса влаги в различных фазовых состояниях, поскольку они не имеют принципиального значения для описания динамического ядра модели. В этом упрощенном варианте модель NMM имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\left(1-\varepsilon\right)\nabla_\sigma \Phi - \alpha \vec{k} \times f, \tag{14}$$

$$w = \frac{1}{g}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{V}\nabla_\sigma \Phi + \dot{\sigma}\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma}\right), \tag{15}$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \mu\left(\nabla_\sigma \vec{V} + \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}\right) = 0, \tag{16}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{g}\left(\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{V}\nabla_\sigma w + \dot{\sigma}\frac{\partial w}{\partial \sigma}\right), \tag{17}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_1 = -\vec{V}\cdot\nabla_\sigma T - \dot{\sigma}\frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{\alpha}{c_p}\left[\vec{V}\cdot\nabla_\sigma p - \left(1+\varepsilon\right)\int \nabla_\sigma \cdot \left(\mu \vec{V}\right) d\sigma'\right], \tag{18}$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_2 = \frac{\alpha}{c_p}\left[\frac{\partial p}{\partial t} - \left(1+\varepsilon\right)\frac{\partial \pi}{\partial t}\right], \tag{19}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\mu\alpha, \tag{20}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = \mu\left(1+\varepsilon\right), \tag{21}$$

$$\alpha = \frac{RT}{p}. \tag{22}$$

Эта система содержит 9 уравнений и 9 неизвестных, т.е. является замкнутой. Два уравнения сохранения массы в негидростатической (15) и гидростатической (16) формулировках тождественны используемым в ARW. Остальные прогностические и часть диагностических соотношений содержат члены с ε и отличаются от соответствующих уравнений в других моделях. В отличие от других аналогичных негидростатических систем присутствие ε указывает, где и как проявляется негидростатичность.

Book_Gidromet.indb Sec1:100 13.01.2010 13:13:13

Большая часть переменных в системе (14) — (22) имеет те же обозначения, что и в модели ARW, поэтому ниже будут пояснены только обозначения, не встречавшиеся ранее:

$\vec{V}$ — горизонтальный вектор скорости;

σ — орографическая гидростатическая координата, тождественная координате η в 2.1.1;

$\dot{\sigma}$ — вертикальная скорость в орографических координатах;

∇_σ — плоский оператор градиента в орографических координатах.

Следует отметить, что в модели NMM используются повернутые сферические координаты, в которых экватор смещается в середину области расчетов. Такие координаты использовались ранее в модели Eta (США) и локальной модели LM Метеорологической службы Германии. Эти координаты удобны тем, что при сравнительно небольших размерах области, характерных для локальных и региональных моделей, расчеты ведутся на почти равномерной (в линейном смысле) широтно-долготной сетке. В связи с этим необходимо помнить, что все плоские операторы, присутствующие в уравнениях (14) — (18), являются операторами в сферических координатах.

2.2.2. Метод численного решения

Из-за ограниченного объема статьи здесь будет рассмотрена только общая схема интегрирования системы (14) — (22).

Расчеты начинаются с получения вспомогательных и промежуточных полей с использованием явных схем.

1. Рассчитывается вертикальная скорость в гидростатической сигма-координате $\dot{\sigma}^n$ из уравнения неразрывности, которое в случае гидростатичности соленоидально, а также тенденция приземного давления μ^{n+1} из уравнения (16).

2. Из уравнения для локального изменения давления

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \left(1+\varepsilon\right)\frac{\partial \pi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t_\pi} \qquad (23)$$

с использованием μ^{n+1} определяется промежуточное давление p_1.

3. Рассчитывается член, представленный квадратной скобкой в уравнении (18), а затем и промежуточная температура T_1 из этого уравнения.

4. Из (19) определяется окончательная температура T^{n+1}. Так как это уравнение неявно по давлению, то получение T^{n+1} происходит позднее, после вычисления p^{n+1}.

Book_Gidromet.indb Sec1:101 13.01.2010 13:13:14

5. Из (20) с использованием явной схемы вычисляется промежуточное значение геопотенциала Φ_1, а затем с использованием неявной схемы производится вычисление окончательного поля геопотенциала Φ^{n+1}.

6. Из уравнения (15) рассчитывается промежуточное значение вертикальной скорости w_1, а из (17) — промежуточное значение ε_1. Окончательное значение ε^{n+1} определяется из (21).

7. С использованием схемы Адамса-Бэшфорта для расчета адвекции производится расчет промежуточных значений горизонтальных компонентов скорости в (14), а затем расчет окончательных скоростей $\vec{V}^{n+1}$ с учетом сил градиента давления и Кориолиса.

Для расчета окончательных переменных: T^{n+1}, Φ^{n+1}, ε^{n+1} и $w^{n+1/2}$ применяются неявные схемы, поэтому четыре уравнения с этими неявными схемами используются для исключения всех этих переменных и получения уравнения для p^{n+1}. Сначала решается это уравнение и получается p^{n+1}, а затем из соответствующих неявных уравнений определяются T^{n+1}, Φ^{n+1}, ε^{n+1} и $w^{n+1/2}$.

Интегрирование уравнений ведется на сетке *E* в горизонтальной плоскости по классификации Аракавы. По вертикали используется расшатанная сетка Лоренца. Для горизонтальной адвекции температуры и горизонтальных компонентов скорости используется схема Адамса-Бэшфорта. Для вертикальной адвекции *u*, *v* и *T* применяется схема Кранка-Николсона.

Так же как и ARW, модель NMM может прогоняться в гидростатическом и негидростатическом вариантах. Сопоставление расчетов по обоим вариантам показало, что при использовании негидростатического варианта количество вычислений и размер памяти увеличиваются примерно на 20%. При разрешении сетки ниже 8 км негидростатические эффекты проявляются слабо.

2.3. Параметризации физических процессов в моделях ARW и NMM

Некоторые параметризации физических процессов применяются в обеих моделях, а некоторые могут быть применены только в одной из них. Поскольку имеется общность в ряде параметризаций, удобнее рассматривать их не для каждой модели отдельно, а сделать разбиение по типам параметризуемых процессов и обсуждать параметризации каждого процесса последовательно в моделях ARW и NMM, указывая попутно на их общность или отличия.

Book_Gidromet.indb Sec1:102 13.01.2010 13:13:14

2.3.1. Параметризация подсеточной турбулентности

Модель ARW

В модель ARW можно включить 4 варианта задания (расчета) коэффициентов горизонтальной (K_h) и вертикальной (K_v) турбулентностей.

Первый вариант предусматривает простое задание пользователем постоянных значений K_h и K_v.

Во втором варианте производится расчет только горизонтальной турбулентности по горизонтальной деформации с использованием замыкания первого порядка по Смагоринскому.

В третьем варианте используется трехмерное замыкание по Смагоринскому.

В четвертом варианте в определение коэффициентов обмена входит турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ), которая отыскивается замыканием порядка 1,5. С формой записи уравнения ТКЭ, а также алгоритмами всех параметризаций подсеточной турбулентности можно познакомиться в работе Скамароха и др. [68].

Следует отметить, что при включении в модель параметризаций пограничного слоя, где также рассчитываются K_v, расчет K_v по приведенным выше алгоритмам блокируется и используется значение K_v, рассчитанное с помощью используемой параметризации пограничного слоя, которая распространяется в части K_v на всю область.

Модель NMM

В этой модели рассчитывается только коэффициент горизонтальной турбулентности K_h, так как подразумевается, что K_v рассчитывается в параметризации пограничного слоя. Способ расчета K_h перенесен в модель NMM из модели Eta [23] и базируется на идее пропорциональности K_h тензору деформации, высказанной Смагоринским (1963). Используется, однако, не деформация, а выражение, пропорциональное деформации, но модифицированное добавлением члена ТКЭ, как это было сделано в работах Лили [39] и Ксю [81].

Предполагается, что коэффициенты горизонтальной турбулентности для тепла и влаги $K_{H,h}$ связаны с коэффициентами турбулентности для количества движения $K_{M,h}$ соотношением $K_{H,h} = 1{,}25K_{M,h}$.

2.3.2. Параметризация микрофизических процессов

Параметризации микрофизических процессов являются общими для моделей ARW и NMM. Имеется возможность использовать 9 различных параметризаций с различной степенью учета гидрометеоров

Book_Gidromet.indb Sec1:103 13.01.2010 13:13:15

в жидкой и твердой фазах и соответствующих микрофизических процессов. Из-за ограниченного объема статьи здесь будут даны лишь краткие описания параметризаций. Их более полное изложение имеется в оригинальных работах, ссылки на которые даются при обсуждении каждой параметризации.

Параметризация Кесслера

Это самая простая параметризация, изложенная в работе Кесслера [34] и учитывающая облака и осадки только в жидкой фазе. Облачность характеризуется только водностью q_{cw}, а осадки считаются распределенными в соответствии с формулой Маршалла-Пальмера

$$N = N_0 \exp\left(-\lambda D\right), \tag{24}$$

где N_0 — пересечение, имеющее размерность $м^{-4}$, λ — наклон распределения, имеющий размерность $м^{-1}$, D — диаметр капель. Таким образом, в распределении (24) при задании N_0 имеется только один свободный параметр λ и параметризация является одномоментной: прогностическое уравнение решается только для третьего момента распределения — водности осадков q_r. Так как облака и осадки существуют только в жидкой фазе, в процедуре конденсационного приспособления и других процедурах насыщение рассчитывается над водой. В параметризации представлено три микрофизических процесса: автоконверсия (переход облачной воды в осадки после достижения некоторой пороговой водности облаков q_{cw0}), аккреция (захват каплями падающих осадков капель облачности) и испарение выпадающих осадков. Детали параметризации можно найти в работе Кесслера [34].

Параметризация Линя

Эта параметризация названа в моделях WRF по имени первого автора работы Линь и др. (40), хотя в ней использованы алгоритмы из многих предыдущих работ, среди которых будут упомянуты лишь некоторые.

В параметризации имеется 5 классов гидрометеоров, которые характеризуются соответствующими удельными долями влаги: водностью облаков, ледностью облаков q_{ci}, водностью дождя, ледностью снега q_s и ледностью крупы (граупелей) q_g. Прогностические уравнения решаются для q_r, q_s, q_g и q, где $q = q_v + q_{cw} + q_{ci}$. Частицы облаков считаются монодисперсными, а частицы дождя, снега и крупы — распределенными по формуле (24), но с разными пересечениями для каждого вида осадков.

Первоначальная гипотеза о конденсации над водой при температурах выше –40°С была заменена гипотезой гибридного насыщения Лорда [42], которую затем развили в своей работе Тао и МакКамбер [71]. Смысл

Book_Gidromet.indb Sec1:104 13.01.2010 13:13:15

гибридного насыщения состоит в том, что в диапазоне температур от 0°С до $T = T_{00}$ (T_{00} принимается обычно равной от –30 до –40°С) происходит линейное изменение удельной водности насыщения от ее значений над водой q_{sw} до значений насыщения надо льдом q_{si}. Все гидрометеоры считаются сферическими. Дождь, снег и крупа отличаются только плотностью. В параметризации представлены следующие процессы.

Образование кристаллической облачности, таяние кристаллической облачности и переход ее в капельную при положительных температурах, рост ледяной фазы облаков вследствие отложения на кристаллах облачной воды, однородное замерзание облачной воды и превращение ее в лед.

Процессы, связанные с образованием (исчезновением) дождя, включают автоконверсию капельной облачности в дождь, аккрецию каплями дождя облачных капель, аккрецию облачного льда дождем, аккрецию дождя облачными кристаллами и испарение дождя.

Процессы, приводящие к образованию (вымыванию) снега включают в себя автоконверсию облачных кристаллов в кристаллы снега, аккрецию снега дождем, аккрецию дождя снегом, аккрецию облачной воды снегом, аккрецию облачного льда снегом, обзернение частиц снега, отложение водяного пара на частицах снега и испарение снега, таяние снега.

Процессы, приводящие к образованию (вымыванию) крупы включают автоконверсию снега в крупу, однородное (иммерсионное) замерзание дождя, аккрецию облачной воды и снега крупой, испарение и таяние крупы.

Параметризации WSM3, WSM5 и WSM6

Эти параметризации родственны, описаны в доступных статьях с разной степенью детальности, поэтому объединены под общим заголовком. Они базируются на модифицированных параметризациях Ратледжа и Хоббса [62, 63] для облачности и осадков в смешанной фазе. Эти параметризации предназначались первоначально для региональной спектральной модели, поэтому названы сокращенно WSM (Water for Spectral Model). Добавление цифры указывает количество гидрометеоров, включенных в параметризацию, причем в число гидрометеоров включен и водяной пар.

Параметризация WSM3 изложена в работе Хонга [20]. Она представляет собой существенную модификацию параметризации Дудья [12], которая, в свою очередь, является сильно упрощенной параметризацией Ратледжа и Хоббса. Основное упрощение в параметризации Дудья состоит в том, что при температуре $T \geq 0$°С облачность и осадки

Book_Gidromet.indb Sec1:105 13.01.2010 13:13:16

предполагаются существующими только в жидкой фазе, а при $T < 0^oC$ они могут быть исключительно в твердой фазе. При переходе через нулевую изотерму происходит мгновенное замерзание и таяние гидрометеоров. Таким образом, в каждой точке области может существовать только 3 типа гидрометеоров: q_v, q_{ci}, q_s при $T < 0$ и q_v, q_{ew}, q_r при $T \geq 0^o C$.

В параметризации WSM3 эта гипотеза сохранена (отсюда цифра 3). Распределение облачных капель и кристаллов считается монодисперсным, а частицы снега и дождя распределены по (24), в которой значения N_0 для снега (N_{0s}) и для дождя (N_{0r}) являются разными. При $T \geq 0^oC$ насыщение рассчитывается над водой, а при $T < 0^oC$ — надо льдом.

Основные нововведения в параметризациях WSM связаны с образованием облачных кристаллов и их дальнейшей эволюцией. Вместо формулы Флетчера [16] введены новые формулы для роста концентрации облачных частиц и скорости их гравитационного оседания. Эволюция кристаллической облачности происходит под действием отложения на ней водяного пара или испарения. Учитывается аккреция облачного льда частицами снега и автоконверсия облачных кристаллов в частицы снега. Рост снега за счет отложения водяного пара или его сублимация производится по формулам из работы Ратледжа и Хоббса [62]. Переход облачной воды в осадки рассчитывается по формуле из работы Триполи и Коттона [75]. В параметризации учитываются также процессы испарения жидких осадков, однородного замерзания и таяния облаков и осадков.

Описания параметризаций WSM5 и WSM6 практически отсутствуют. Очевидно, что в этом случае снимаются ограничения на разделение фаз нулевой изотермой, предполагается существование смешанных фаз для облаков и осадков с добавлением процессов, присутствовавших в параметризации Ратледжа и Хоббса. В этом случае, действительно, существует 5 типов гидрометеоров: q_v, q_{cw}, q_{ci}, q_r, q_s.

При упоминании параметризации WSM6 в Руководстве для пользователей делаются ссылки на статью Линя и др. [40] и Дудья [12]. В последней работе о шестикомпонентной схеме речи вообще не идет. Остается предположить, что по сравнению с WSM5 в схему WSM6 вводится крупа и добавляются соответствующие микрофизические процессы.

Параметризация Ферьера

В Руководстве для пользователей WRF-NMM при упоминании этой параметризации делается ссылка на работу Ферьера и др. [15]. Эта работа представляет собой доклад небольшого объема на конференции, в котором полностью отсутствует формальный текст и дано

Book_Gidromet.indb Sec1:106 13.01.2010 13:13:16

лишь общее описание схемы. Ниже будет приведена информация, содержащаяся в этом докладе.

Параметризация была разработана для модели Eta, она известна также как Eta Ferrier или EGCP01 (Eta Grid-scale Cloud and Precipitation). Затем она была перенесена в модель WRF.

Прогностическими переменными в ней являются водяной пар, облачная вода, дождь и лед. Лед состоит из облачного и осаждающегося. Осадки в жидкой и кристаллической фазах распределены по (24), но пересечения являются переменными. Способ их определения не приведен. Прогностические уравнения решаются для удельной влажности и общего конденсата. Внутри микрофизического блока определяются доли водности и ледности облаков и осадков, составляющих общий конденсат. Конденсация (испарение) и отложение (сублимация) рассчитываются с использованием гибридной удельной влажности насыщения [71]. В микрофизической схеме параметризуются следующие процессы: переход облачной воды в дождь, испарение дождя, таяние льда, аккреция облачной воды льдом, замерзание дождя, конденсация воды на тающем льде, испарение влажного тающего снега. Осадки у поверхности Земли даются в виде дождя, замерзающего дождя, снега в виде хлопьев, крупы и мокрого снега. Вид осадков определяется по их плотности и температуре воздуха.

Параметризация Томпсона

Параметризация Томпсона и др. [74] представляет собой модификацию параметризации Райзнера и др. [61], которая используется в модели MM5. Для модификации использован вариант 4 этой схемы, в котором в качестве прогностических переменных используются q_v, q_{cw}, q_{ci}, q_r, q_s, q_g, а также концентрация облачных кристаллов N_i. Частицы дождя и снега предполагаются распределенными по (24). Пересечение для снега N_{0s} задается функцией температуры в соответствии с экспериментальными данными Хаузи и др. [21], а пересечение для частиц дождя N_{0r} сделано функцией водности жидких осадков с тем, чтобы обеспечить малые скорости гравитационного оседания капель при малой водности осадков. Крупа задается Г-распределением.

Образование ледяных облачных частиц под действием нуклеации параметризуется с использованием формулы Купера [10], базирующейся на прямом измерении концентрации кристаллов в зависимости от температуры. Учитывается также образование облачных кристаллов вследствие гетерогенного и гомогенного замерзаний облачных капель. Параметризуется увеличение концентрации облачных кристаллов

Book_Gidromet.indb Sec1:107 13.01.2010 13:13:16

вследствие их дробления при столкновении, рост облачных кристаллов из-за отложения на них водяного пара и обзернения.

При образовании снега учитывается переход облачных кристаллов в снег под действием отложения, аккреции и агрегации. Учитывается также таяние и сублимация снега.

При образовании крупы параметризуется переход облачного льда в крупу с использованием формулы из работы Икавы и Саито [22], а также ряд фазовых переходов при взаимодействии различных частиц: столкновении капель дождя и облачных кристаллов, захвате облачными кристаллами капель дождя, обзернении снега облачной водой, захвате снегом облачной воды и дождя. Кроме этого учитывается образование крупы вследствие замерзания дождя и ее эволюции под действием отложения (сублимации) и таяния.

При образовании дождя учитывается переход облачной воды в дождевую (автоконверсия), который рассчитывается по формуле Уолко и др. [77], захват дождем капельной облачности и испарение дождя.

Параметризация Центра им. Годдарда

Эта параметризация называется схемой ансамбля конвективных облаков. Она является одномоментной и была разработана Тао и Симпсон [72] на базе параметризаций Линя и др. [40] и Ратледжа и Хоббса [63]. В схему введено несколько модификаций. Во-первых, в ней имеется возможность выбора граупелей или града [45]. Во-вторых, используется методика расчета насыщения, предложенная в работах Тао и МакКамбера [71, 73]. Эта методика обеспечивает невозможность существования насыщения при отсутствии облаков и ненасыщения при наличии облачности. В-третьих, все микрофизические процессы, не связанные с переходом одного типа гидрометеоров в другой (таянием, испарением или сублимацией), рассчитываются на основе термодинамического состояния. Это обеспечивает единообразный расчет всех процессов.

Параметризация Моррисона и др.

Схема Моррисона и др. [52] базируется на двухмоментной параметризации микрофизики [50, 51]. В ней учитывается пять типов гидрометеоров: облачные капли и кристаллы, дождь, снег и граупели (град). Прогностическими переменными являются концентрации и отношения смеси для облачных кристаллов, дождя, снега и граупелей (града) и отношения смеси для облачных капель и водяного пара (решается 10 прогностических уравнений). Прогноз двух моментов (концентрации и отношения смеси) позволяет более робастное представление распределения частиц по размерам. Это распределение задается гамма-

Book_Gidromet.indb Sec1:108 13.01.2010 13:13:17





распределением, пересечение и наклон которого получаются по прогнозируемым концентрациям и отношениям смеси гидрометеоров.

2.3.3. Расчет радиационных потоков

В моделях ARW и NMM имеется возможность выбрать 3 алгоритма для расчета потоков длинноволновой радиации и 3 алгоритма для расчета коротковолновой радиации. Ниже будут применяться сокращения и обозначения алгоритмов, которые используются в описаниях ARW и NMM, а также в Руководствах по их использованию.

Длинноволновая радиация

При расчетах длинноволновой радиации можно воспользоваться алгоритмами RRTM, GFDL и CAM. Первый из них является сокращением от Rapid Radiative Transfer Model. Он был предложен в работе Млоуера и др. [48]. Второй является сокращением от Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, так как он предложен в серии работ Фелса и Шварцкопфа, являющихся сотрудниками Лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL) NOAA. Третий алгоритм был разработан в NCAR для климатической модели общего пользования CAM (Community Atmosphere Model).

Схема RRTM

В схеме RRTM для расчета используется метод коррелированных *k*, где *k* обозначает коэффициент поглощения. Сущность метода состоит в следующем. Спектральный коэффициент поглощения *k(ν)* где — волновое число, изменяется в пространстве волнового числа крайне нерегулярно, поэтому не подходит для прямого определения представительных величин в какой-либо полосе. Однако перестановкой коэффициента в восходящем порядке его значений можно сделать его гладко меняющейся функцией в пространстве некоторой переменной *g*, т.е. построить монотонную гладкую функцию *k(g)*. Функцию g часто называют кумулятивной функцией вероятности. В пределах выбранной полосы поглощения она изменяется от 0 до 1, а *k(g)* монотонно увеличивается с ростом *g*, достигая максимума при $g = 1$, т.е. точке $g = 1$ соответствует центр полосы поглощения в пространстве волновых чисел. Процедура отображения $\nu \rightarrow g$ здесь рассматриваться не будет, с ней можно познакомиться в работе Уэста и др. [78]. Эффект этого упорядочения состоит в перестановке последовательности членов в интеграле по волновым числам в уравнениях переноса излучения. Поэтому радиационный перенос в пространстве *g* может быть рассчитан как в монохроматических моделях.

Book_Gidromet.indb Sec1:109

13.01.2010 13:13:17

Гладкая монотонно увеличивающаяся зависимость κ от g приводит к тому, что выражение для спектрально осредненной радиации в пространстве g поддается аппроксимации. Это достигается подразделением области $0 \le g \le 1$ на интервалы, каждый из которых соответствует ограниченному диапазону значений $k(g)$ и определяет характерную величину k_j коэффициента поглощения для каждого интервала. Эти характерные значения используются для расчета уходящей радиации во всем интервале. Результирующая радиация в полосе (ν_1, ν_2), взвешенная по размерам соответствующих интервалов, получается суммированием и дает аппроксимацию средней радиации.

Метод переносится для расчета переноса радиации в неоднородной атмосфере подразделением ее на слои, каждый из которых обрабатывается указанным выше способом. При условии, что проектирование $\nu \rightarrow g$ идентично в соседних слоях, т.е. распределение k в данном слое полностью коррелированно в спектральном пространстве с распределением в следующем слое, расширение этого метода на неоднородную атмосферу является точным. Поэтому такой подход называется методом коррелированных k (correlated k-method).

В современной версии RRTM учитывается поглощение излучения водяным паром, CO_2, O_3, оксидом азота, метаном, CFC -22 и CCl_4. В спектре от 10 $см^{-1}$ до 3000 $см^{-1}$ выделено 16 полос, для которых определены ключевые и слабые поглотители. Каждая полоса разделена, в свою очередь, на 16 интервалов в пространстве g. Интервалы распределены неравномерно по g. Их количество увеличивается в области g, близких к 1 с тем, чтобы более точно рассчитывать скорость охлаждения, которая определяется, в основном, центрами спектральных линий в полосе.

Метод RRTM проверялся по полинейным расчетам переноса радиации для разных характеристик атмосферы. Получено, что отличия от полинейных расчетов не превышают 0,6 $Вт/м^2$ для суммарного потока во всех полосах и на всех высотах, а общая ошибка (во всем диапазоне от 10 $см^{-1}$ до 3000 $см^{-1}$) меньше 1 $Вт/м^2$ на любой высоте. Ошибка в расчете охлаждения в тропосфере и нижней стратосфере составляет 0,07 К/день, а в верхней стратосфере и выше 0,75 К/день.

Схема GFDL

Схема GFDL применялась в ряде численных моделей, разработанных в этой лаборатории, а также в модели Eta, откуда она была перенесена в модель WRF.

В схеме учитывается поглощение водяным паром, CO_2 и O_3. Расчеты проводятся в восьми полосах в диапазоне волновых чисел от

Book_Gidromet.indb Sec1:110 13.01.2010 13:13:18

0 до 2200 см$^{-1}$, причем в некоторых полосах производится дополнительное выделение более узких полос. Предложенный алгоритм был тщательно откалиброван по полинейным расчетам переноса ИК-излучения. Структура выбора спектрального разрешения и спектральных интервалов в различных полосах была подобрана на основе калибровки по полинейным расчетам. Более детальную информацию о схеме можно найти в работах Фелса и Шварцкопфа [14, 65, 66].

Схема CAM

Это спектральная схема. Здесь используется версия 3.0 этой схемы (CAM 3.0), ее отличие состоит в учете нескольких малых газовых компонентов. В алгоритме учитывается сеточная и подсеточная облачность. Описание этой схемы имеется в работе Коллинса и др. [9].

Коротковолновая радиация

Для расчета потоков коротковолновой радиации в моделях ARW и NMM предлагается 3 алгоритма: схема MM5 (Дудья), схема Eta GFDL и схема CAM NCAR. Описание схемы Дудья имеется в работе автора [12], описание схемы Eta GFDL — в работе Лациса и Хансена [37], а схемы CAM — в работе Коллинса и др. [9].

Схема Дудья

Эта параметризация описана в статье Дудья [12]. При расчете нисходящей коротковолновой радиации учитывается влияние зенитного угла солнца, поглощающие и отражающие свойства облачности и водяного пара в безоблачной атмосфере. В каждом узле сетки задается доля облачности (от 0 до 1). Альбедо облачности и поглощение облачностью получаются билинейной интерполяцией значений, которые заданы таблично для разных значений косинуса зенитного угла солнца μ и $\ln\left(w/\mu\right)$, где w (кг/м^2) — водозапас облачности в столбе. Ослабление радиации рассчитывается послойно спуском вниз по узлам сетки. Поглощение солнечной радиации водяным паром в безоблачной атмосфере рассчитывается по данным о μ и влагозапасе вышележащего столба воздуха. Зависимость поглощения радиации от влагозапаса воздуха взята из работы Лациса и Хансена [37]. Рассеяние безоблачной атмосферой принимается однородным и пропорциональным массе воздушного столба с поправкой на зенитный угол солнца.

Схема Eta GFDL

Эта схема [37] использовалась первоначально в глобальной модели GISS (Goddard Institute for Space Studies), а затем в модели GFDL Eta.

Book_Gidromet.indb Sec1:111 13.01.2010 13:13:18

В схеме производится расчет поглощения солнечной радиации в плоскопараллельной атмосфере, состоящей из некоторого количества однородных слоев. Свойства монохроматического рассеяния каждого однородного слоя определяются его оптической толщиной τ, альбедо однократного рассеяния ϖ_0 и фазовой функцией $p(\alpha)$, где α — угол рассеяния. Для расчета переноса излучения используется метод «сложения». Этот метод дает способ получения функции отражения и пропускания в составном слое, состоящем из верхнего и нижнего слоев. Схема сложения и удвоения используется для калибровки параметризационных формул. При расчете поглощения солнечной радиации озоном включены эффекты Релеевского рассеяния и альбедо подстилающей поверхности. Способ задания профилей озона, используемый в настоящее время, неясен.

Поглощение радиации водяным паром рассчитывается с помощью отдельных формул для облачных и безоблачных условий, в которых используется информация об эффективном влагозапасе слоя на пути прямого и отраженного луча. При расчете поглощения в облачных условиях приближенный учет многократного рассеяния производится с помощью функции вероятности для коэффициента поглощения *p(k)*. Для расчета поглощения водяным паром в облачной атмосфере используется метод сложения. Поглощение каплями облачности непосредственно не рассчитывается. Так как поглощение облачной водой происходит грубо в тех же спектральных интервалах, что и водяным паром, водозапас облачности добавляется к влагозапасу при расчете альбедо однократного рассеяния.

Схема CAM

Это спектральная схема, используемая в климатической модели общего пользования NCAR. В ней имеется возможность учета оптических свойств некоторых видов аэрозолей и малых газовых компонентов. Описание схемы имеется в работе Коллинса и др. [9].

2.3.4. Параметризация пограничного слоя

В моделях ARW и NMM может быть выбрано 4 параметризации пограничного слоя, дающие вертикальные турбулентные потоки количества движения, тепла и влаги. Первая из параметризаций называется MRF, поскольку она была заимствована из глобальной модели среднесрочного прогноза NCEP MRF (Medium Range Forecast). Вторая параметризация именуется YSU (Yonsei State University в Южной Корее). Третья параметризация носит название MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) по ее авторам. Четвертая параметризация называется ACM2

Book_Gidromet.indb Sec1:112 13.01.2010 13:13:18

(Asymmetrical Convective Model, версия 2). Ниже будет дана краткая информация о каждой из этих параметризаций.

Параметризация MRF

Описание этой параметризации имеется в статье Хонга и Пэна [19]. Она относится к классу так называемых нелокальных моделей. Нелокальность состоит в том, что вводится поправка к локальному градиенту, которая учитывает вклад крупных вихрей. Этот подход был предложен впервые Дирдорфом [11] и использовался затем во многих работах. В схеме производится расчет коэффициента вертикального обмена для количества движения K_{mz} с использованием информации о вертикальных градиентах температуры и ветра, рассчитывается турбулентный аналог числа Прандтля, предполагающийся постоянным во всем слое, и определяется K_{tz} для использования в уравнениях переноса температуры и влажности. Вклад от крупных вихрей определяется в зависимости от величины конвективных потоков на верхней границе приземного слоя, которые выражаются через функции устойчивости.

Параметризация университета Ёнсей (YSU)

Краткое описание этой параметризации имеется в работе Но [53], однако тезисы этого доклада авторам лекции были недоступны, поэтому здесь будет дана лишь очень краткая информация, содержащаяся в работе Скамароха [68] и в Руководстве по WRF-NMM [76].

Эта параметризация является модификацией параметризации MRF. В ней также присутствует противоградиентный член, т.е. она является нелокальной. По сравнению со схемой MRF, в схему YSU добавлен слой вовлечения на верхней границе пограничного слоя. Вовлечение предполагается пропорциональным потоку плавучести в приземном слое, что соответствует результатам прямого моделирования неустойчиво стратифицированного пограничного слоя. Это позволило понизить рассчитываемую высоту пограничного слоя, которая в схеме MRF систематически завышалась.

Параметризация Меллора-Ямады-Янича (MYJ)

Эта параметризация турбулентности в пограничном слое и свободной атмосфере представляет собой модификацию схемы замыкания Меллора-Ямады уровня 2,5 по классификации Меллора-Ямады [46, 47]. Параметризация изложена в серии работ Янича [24, 25, 26].

Параметризация строится на уравнении турбулентной кинетической энергии, в правую часть которого входят члены, зависящие от вертикальных градиентов ветра и потенциальной температуры,

Book_Gidromet.indb Sec1:113 13.01.2010 13:13:19

которые продуцируют турбулентную кинетическую энергию. Масштаб длины, входящий в уравнение, рассчитывается по формуле, предложенной в работе Меллора и Ямады [46]. В расчеты масштаба длины и ряда других коэффициентов входят значения турбулентной кинетической энергии. Расчеты выполняются в следующем порядке: рассчитывается турбулентная кинетическая энергия, а затем масштаб длины. После этого рассчитываются коэффициенты двух уравнений замыкания. Решением этих уравнений находятся значения двух вспомогательных функций для потоков количества движения и тепла, а по ним определяются коэффициенты вертикального турбулентного обмена для количества движения, тепла и пассивного скаляра.

Модификация схемы Меллора-Ямады Яничем состояла в том, что были введены ограничения на значения коэффициентов в системе уравнений, которые гарантировали ненулевые значения определителя системы при больших вертикальных сдвигах скорости или большой статической неустойчивости. Практически это позволяет избежать очень больших коэффициентов турбулентного обмена при неустойчивой стратификации.

Так как адвективные члены в уравнении энергии могут давать отрицательные значения энергии q^2, то при $q^2<0$ они заменяются положительными значениями. В схему включена также диагностика, которая позволяет идентифицировать отрицательность правой части уравнения турбулентной энергии или ее слишком большой рост на шаге по времени и вводить соответствующие коррекции.

Параметризация ACM2

Эта параметризация была разработана Плеймом [59]. Она представляет собой модификацию конвективной модели Блакадара и диффузионной модели. В конвективных условиях ACM2 воспроизводит быстрый вертикальный перенос в плавучих термиках и под действием локальных сдвигов, вызванных турбулентной диффузией. Доля локальных и нелокальных компонентов в вертикальном переносе определяется по методике, предложенной в работе Холстлага и Бовиля [18]. Параметризация ACM2 особенно хорошо приспособлена для переноса в пограничном слое метеорологических переменных и малых химических компонентов.

2.3.5. Параметризация приземного слоя

В параметризации приземного слоя рассчитываются потоки количества движения (или напряжения τ), доступного тепла H и потоки

Book_Gidromet.indb Sec1:114 13.01.2010 13:13:19

влаги (или скрытого тепла E) с использованием тех или иных подходов к расчетам соответствующих коэффициентов обмена. Потоки τ, H и E используются как в параметризациях пограничного слоя, так и в схемах подстилающей поверхности и почвы. Соотношения для этих потоков на поверхности практически во всех параметризациях имеют одну общую форму:

$$\tau = \rho C_d \left| u_a \right|^2, \tag{25}$$

$$H = \rho c_p C_h \left| u_a \right| \left(\theta_s - \theta_a \right), \tag{26}$$

$$E = \rho C_e \left| u_a \right| \left(q_s - q_a \right). \tag{27}$$

Здесь ρ — плотность воздуха, c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении. Значения скорости, потенциальной температуры и удельной влажности с индексом а относятся к нижнему уровню модели, а значения переменных с индексом s — значения на поверхности Земли, причем θ_s получается обычно из уравнения теплового баланса на поверхности. C_d, C_h и C_e — коэффициенты обмена на поверхности для количества движения, тепла и водяного пара, соответственно. В большинстве случаев принимается, что $C_h = C_e$.

Различные методики параметризации приземного слоя различаются по существу подходом к расчету C_d и C_h. Схемы приземного слоя не дают тенденций, а только диагностическую информацию для моделей пограничного слоя и моделей подстилающей поверхности и почвы.

В настоящее время в моделях WRF каждая схема приземного слоя связана с определенными схемами пограничного слоя и с определенными моделями подстилающей поверхности и почвы. В дальнейшем их предполагается сделать универсальными.

При описании модели ARW [68] и модели NMM [76] указывается различное число моделей приземного слоя. У Скамароха и др. упоминаются схемы подобия MM5, Eta и Плейма-Ксю, а в Руководстве по NMM упоминается дополнительно схема подобия GFS.

Схема подобия MM5 должна применяться с моделями пограничного слоя MRF и YSU (см. 2.3.4). Схема подобия Eta должна применяться только с моделью пограничного слоя MYJ (см. 2.3.4), а схема Плейма-Ксю — с моделью пограничного слоя Плейма, а также с другими моделями пограничного слоя (см. 2.3.4). Относительно связи схемы подобия GFS с определенной параметризацией пограничного слоя в Руководстве по WRF-NMM ничего не сказано. Можно лишь заключить, что раз эта схема тестировалась на модели WRF-NMM,

Book_Gidromet.indb Sec1:115 13.01.2010 13:13:20

то она определенно совместима с моделью пограничного слоя MYJ, которая рекомендована для использования в модели NMM.

При рассмотрении отдельных параметризаций изложение будет завершаться вычислением коэффициентов обмена типа C_d, C_h и C_e, поскольку вид формулы для расчета потоков на поверхности аналогичен приведенным в (25) — (27).

Схема подобия MM5

В схеме MM5 для расчета коэффициентов обмена применяются функции устойчивости Паулсона [57]. Эти функции устойчивости для количества движения ψ_m и тепла ψ_h используются для восстановления профилей скорости и температуры в приземном слое, по которым последовательно можно рассчитать C_d, C_h и C_e.

Схема подобия Eta (Янича)

Наиболее подробная информация по этой параметризации может быть найдена в работах Чен и др. [7] и Янича [25, 26, 27]. В этой схеме также используются функции устойчивости Паулсона, так как они оказались лучше двух других проверявшихся: функций, базирующихся на замыкании Меллора-Ямады второго порядка, предложенных в работе Лобоцкого [41] и функций, базирующихся на расчете числа Ричардсона. В схему Паулсона были внесены усовершенствования, предложенные в работе Зилитинкевича [82] и относящиеся к отысканию взаимосвязи между шероховатостями для потока количества движения и тепла. В схему приземного слоя, как над океаном, так и над сушей, введен вязкий подслой. В этом случае производится расчет потоков количества движения, тепла и влаги на верхней границе турбулентного подслоя, находящегося над вязким подслоем.

Схема подобия GFS

Эта схема используется в глобальной модели GFS NCEP. Потоки количества движения и скрытого тепла на поверхности рассчитываются с использованием формулировки Миякоды и Сирутиса [49], модифицированной для случаев большой устойчивости и неустойчивости. Испарение с поверхности суши состоит из трех компонентов: испарения с почвы, растительности и транспирации растительностью. Расчет испарения производится по методике, предложенной в работе Пэна и Марта [56].

Схема подобия Плейма-Ксю

Схема приземного слоя Плейма-Ксю [58] была разработана как часть модели поверхности суши тех же авторов, но может быть использована

Book_Gidromet.indb Sec1:116 13.01.2010 13:13:20





и с другими моделями пограничного слоя и поверхности суши. Эта параметризация базируется на теории подобия и включает в себя параметризацию вязкого подслоя в виде квазиламинарного слоя сопротивления. В ней учитываются различия в диффузионных потоках тепла, водяного пара и химических компонентов. Функции подобия находятся аналитически по имеющимся модельным переменным.

2.3.6. Параметризация процессов на поверхности и в почве

Формально пользователи WRF могут включить в модель 4 схемы подстилающей поверхности и почвы: пятислойную модель термической диффузии, унифицированную модель Noah, модель RUC и модель Плейма-Ксю.

В пятислойной модели, которая перенесена в ARW из MM5, производится только перенос тепла в почве, поэтому она представляет ограниченный интерес с точки зрения прогноза погоды. Унифицированная схема Noah подогнана к моделям ARW и NMM. Схема RUC, заимствованная из региональной модели RUC (Rapid Update Cycle), и схема Плейма-Ксю пока что применялись только в модели ARW.

Модели подстилающей поверхности и почвы активизируются только на поверхности суши и морского льда. В них используется информация из моделей приземного слоя, радиационные потоки из моделей переноса излучения, осадки из блоков параметризации микрофизики и переноса осадков сеточного масштаба и параметризации конвекции, а также информация, характеризующая поверхность и верхний слой почвы. Выходной информацией моделей подстилающей поверхности и почвы являются потоки тепла и влаги с поверхности. Эти потоки образуют граничные условия для расчета вертикального переноса в пограничном слое атмосферы. Все упомянутые выше модели являются одномерными, т.е. процессы горизонтального обмена в почве не воспроизводятся. Ниже будут даны краткие характеристики всех четырех схем.

Пятислойная модель термической диффузии

В модели имеется 5 слоев, нижние границы которых находятся на глубине 1, 2, 4, 8 и 16 см. Ниже температура задается в виде среднего значения в нижележащем слое большой глубины. Процессы, связанные с растительным покровом, в ней не учитываются, рассчитывается только перенос тепла в почве. На поверхности решается уравнение теплового баланса. Может быть использован признак снежного покрова, который фиксируется на всем отрезке интегриро-

Book_Gidromet.indb Sec1:117

13.01.2010 13:13:20

вания модели. Влажность почвы задается климатической в зависимости от типа землепользования и сезона года. Информацию по этой схеме можно найти в работе Скамароха и др. [68].

Унифицированная модель Noah

Эта модель базируется на имеющем суточный ход потенциальном испарении Пенмана, которое было положено в основу модели, предложенной Мартом и Эком [43], многослойной модели почвы Марта и Пэна [44], а также простой модели Пэна и Марта [56]. Последняя модель была усовершенствована в работе Чен [6] посредством включения более сложного сопротивления кроны, предложенного в работах Нуалена и Плэнтона [54] и Жакемина и Нуалена [23].

В модели имеется однослойная крона и один слой снега. Прогностическими переменными являются температура и влажность почвы, вода, перехваченная кроной, и снег, накопленный на поверхности. В почве имеется 4 слоя, нижние границы которых находятся на глубине 0,1; 0,3; 0,6 и 1,0 м. Общая глубина рассматриваемого почвенного слоя составляет 2 м, а корневая система ограничивается верхним метровым слоем. Нижний метровый слой действует как резервуар с гравитационной инфильтрацией. Дальнейшее краткое описание будет сделано, в основном, по работе Чен и Дудья [8], поскольку в ней приведены последние (из опубликованных) модификаций, внесенных в модель.

Перенос тепла в почве рассчитывается с помощью уравнения теплопроводности, в котором объемная теплоемкость и теплопроводность являются функциями объемной влажности и структуры почвы. Интегрирование уравнения теплопроводности ведется с использованием схемы Кранка-Николсона. Перенос влаги в почве рассчитывается с помощью уравнения переноса удельной влажности, в котором коэффициент диффузии и гидравлическая проводимость являются функциями влажности почвы. В источники и стоки входят осадки и транспирация растительностью. На нижней границе почвенного слоя гидравлическая проводимость считается нулевой, так что поток воды на нижней границе происходит только за счет гравитационной инфильтрации. Для описания поверхностного стока использована водобалансная двухрезервуарная модель Шааке и др. [64]. Поверхностный сток в ней определяется как избыток осадков, который не просочился в почву. Полное испарение с поверхности представляется в виде суммы трех компонентов: прямого испарения из верхнего слоя почвы, испарения воды, перехваченной кроной, и транспирации кроной и корневой системой.

Book_Gidromet.indb Sec1:118 13.01.2010 13:13:21

Снег в модели представлен одним слоем. Воспроизводятся процессы его накопления, таяния, а также процессы теплообмена на границах с атмосферой и подстилающей поверхностью. Осадки считаются снегом, если температура нижнего атмосферного слоя ниже 0°С.

Морской лед подразделен на 4 слоя толщиной 0,75 м каждый, а его общая толщина считается равной 3 м. Предполагается, что на льду имеется снежный покров толщиной 0,1 м. Для переноса тепла в толще льда используется уравнение теплопроводности. На нижней границе льда фиксируется температура –2°С.

Эта модель была усовершенствована в NCEP применительно к модели Eta. В ней был устранен ряд недостатков, обнаруженных в процессе работы с моделью Noah. Эти усовершенствования описаны в работе Эка и др. [13]. Они касаются, в основном, моделирования процессов на поверхности и в почве в холодный сезон года, процесса испарения с голой почвы, расчета коэффициента теплопроводности почвы и транспирации растительностью.

Сделан учет замерзания почвы и пятнистости снежного покрова. Учет пятнистости состоит в том, что при глубине снежного покрова менее некоторого порогового значения разрешаются открытые участки поверхности с температурой выше 0°С. Введение пятнистости улучшило качество прогноза температуры в дневные часы, которая в случае пятнистого снежного покрова в модели Noah занижается, т.к. температура может подняться выше 0°С только при полном стаивании снега. Пятнистость снега учитывается также при расчете альбедо.

В связи с тем, что использовавшаяся в модели методика расчета испарения с голой почвы Марта и Пэна [44] приводила к быстрому сокращению испарения вследствие иссушения почвы, была предложена альтернативная методика, которая дает быстрое высыхание только верхнего слоя почвы, который «прикрывает» от быстрого высыхания нижние слои почвы.

Эксперименты с унифицированной параметризацией Noah показали, что нововведения в представлении процессов холодного сезона практически устранили отрицательную смещенность в прогнозах температуры вблизи земной поверхности. Изменение методики расчета испарения с голой почвы увеличило суточную амплитуду температуры, которая раньше занижалась.

Модель RUC

В этой модели имеется 6 слоев в почве до глубины 3 м, один или два слоя снега (в зависимости от толщины снежного покрова), но отсутствует

Book_Gidromet.indb Sec1:119 13.01.2010 13:13:21

морской лед. В отличие от модели Noah в ней учитываются процессы замерзания почвы. В остальном эта модель сходна с моделью Noah. Подробное описание схемы можно найти в работах Смирновой и др. [69, 70].

Модель Плейма-Ксю

Эта схема развивалась на базе модели ISBA [54] в работах Плейма и Ксю [60, 80]. Она представляет собой двухслойную модель возбуждения-восстановления для температуры и объемной влажности почвы. Верхний слой имеет толщину 1 см, а нижний — 99 см. Потоки влажности на поверхности реализуются эвапотранспирацией, испарением с поверхности почвы и влажной кроны. Сеточные характеристики растительности и почвы получаются по данным о долях различных типов растительности и почвы в пределах ячейки модельной вычислительной сетки. Имеется утилита, с помощью которой можно использовать информацию о температуре и влажности почвы после предыдущего интегрирования модели при ее последующем интегрировании.

2.3.7. Параметризация конвекции

Пользователям моделей ARW и NMM предоставляются следующие возможности: не использовать параметризации конвекции или использовать следующие схемы: Каина-Фритша, Беттса-Миллера-Янича, ансамбль Грела-Дэвени и Грела 3d. Ниже дается краткое описание этих схем.

Схема Беттса-Миллера-Янича

Эта схема изложена, в основном, в статье Беттса [4], а подбор внешних параметров сделан во второй части этой работы [5]. В связи с некоторыми недостатками она была модифицирована в работе Янича [24].

Параметризация основана на упрощенном уравнении притока тепла в предположении существования баланса между вертикальной адвекцией и конвективным притоком тепла

$$-g\frac{\partial F}{\partial p} = \left(R - \overline{S}\right)\tau. \qquad (28)$$

Здесь F — конвективный поток тепла, R — реперный квазиравновесный термодинамический профиль, $\overline{S}$ — влажная статическая энергия сеточного масштаба, τ — время релаксации (приспособления) к равновесному профилю R за счет конвекции от его первоначального состояния $\overline{S}$. Существо параметризации состоит в отыскании реперных равновесных профилей. Эта процедура изложена в цитировавшихся выше работах, как для мелкой, так и для глубокой конвекции.

Book_Gidromet.indb Sec1:120 13.01.2010 13:13:22

Схема Каина-Фритша

Эта схема изложена в работах Каина и Фритша [31, 32], а также в работе Каина [30]. В последней работе дано резюме изменений, внесенных в схему с учетом недостатков, обнаруженных при ее использовании в различных моделях.

Основное отличие параметризации Каина-Фритша (КФ) от аналогичных моделей, базирующихся на рассмотрении единичного конвективного облака, состоит в новом подходе к расчету вовлечения и истечения в одномерной модели облака. В этой параметризации предполагается, что смесь, приобретающая отрицательную плавучесть, вытекает из облака, а смесь, приобретающая положительную плавучесть, в облако вовлекается. Такой процесс перемешивания оценивается по слоям и обеспечивает двухсторонний обмен между облаком и окружением.

Термодинамические характеристики в области восходящих движений рассчитываются в предположении сохранения в поднимающейся частице эквивалентно-потенциальной температуры и общей водной субстанции (суммы водяного пара и гидрометеоров). Скорость потери конденсата в осадки рассчитывается по формуле, предложенной в работе Огуры и Чо [55]. Схема КФ основана на том, что параметризация конвекции удаляет имевшуюся первоначально доступную потенциальную энергию (CAPE). В схеме предполагается удаление, по крайней мере 90% CAPE в процессе параметризации. Период релаксации (конвективного приспособления) составляет от 0,5 ч до 1 ч. В схеме рассчитываются тенденции температуры и влажности, определяющие обратное воздействие конвекции на соответствующие сеточные поля. По умолчанию конвективные осадки мгновенно оказываются на поверхности Земли, но в программе есть переключатель, которым можно активировать обратное влияние осадков, начиная с уровня их образования.

Ансамбль Грела-Дэвени

В работе Грела и Дэвени [17] предложено делать ансамбль параметризаций, в которых, во-первых, используются разные гипотезы статического и динамического контроля, а, во-вторых, внешние параметры, используемые в разных гипотезах, задаются несколькими значениями определенными по той или иной методике плюс несколькими их возмущенными значениями. В результате, получается ансамбль параметризаций, состоящий из нескольких подансамблей, который можно применять так же, как ансамбль прогнозов: вычислять средние по ансамблю значения, набирать статистику успешности каждого члена ансамбля и затем вычислять среднее взвешенное по качеству каждого

Book_Gidromet.indb Sec1:121 13.01.2010 13:13:22





члена ансамбля значение, строить функцию плотности вероятности и определять наиболее вероятное значение.

Ансамбль Грела 3d

Эта схема имеет много общего со схемой Грела-Дэвени, но в ней используется гипотеза о квазиравновесном состоянии между членами ансамбля. Ее отличительной особенностью является учет эффектов опускания в окрестностях кучевых облаков.

3. Общая структура прогностической системы WRF

Система WRF состоит из следующих основных блоков: предварительной обработки (WRF Preprocessing System, WPS), инициализации, модели WRF (динамических модулей ARW или NMM и параметризаций) и системы подготовки и вывода модельной продукции (WRF-POST). Для модели ARW существует дополнительный блок трехмерного вариационного усвоения наблюдений. Ниже дается краткое описание каждого блока.

Предварительная обработка (WPS)

Система предварительной обработки представляет собой комплекс из трех программ, который готовит входные данные для программы инициализации real.exe при расчетах по реальным начальным данным. В первой программе Regrid определяются модельные области и производится интерполяция географических и статических переменных в узлы сетки. Во второй программе Ungrib выбираются поля из сводок ГРИБ (сейчас из сводок ГРИБ2). В третьей программе Metgrid производится горизонтальная интерполяция метеорологических полей в узлы модельных сеток, определенных в программе Geogrid.

Инициализация

Инициализация модели WRF-ARW производится в программе Real (название Real относится к случаю прогнозов по реальным данным). В этой программе производится вертикальная интерполяция начальных данных в орографические координаты модели и заготавливаются граничные условия на срок прогноза по данным материнской модели. На этой стадии может быть подключен блок трехмерного вариационного усвоения данных, который здесь обсуждаться не будет. Отметим только, что он обеспечивает усвоение обычных, спутниковых и радиолокационных измерений.

Book_Gidromet.indb Sec1:122

13.01.2010 13:13:22

Модель WRF

Обе модели WRF (ARW и NMM) состоят грубо из двух частей: динамического ядра и набора параметризаций физических процессов. Динамические ядра являются существенно различными. По ним, собственно, и различаются модели ARW и NMM. Многие параметризации являются общими для обеих моделей и выбираются заданием соответствующих признаков (переключателей) в списках вводимых переменных (NAMELIST).

Система подготовки вывода модельной продукции

В обеих моделях имеются блоки диагностики, в которых рассчитывается достаточно большое количество дополнительных переменных, используемых в практике синоптических прогнозов. Кроме этого в системе вывода обеспечивается возможность интерполяции переменных с модельных уровней на изобарические поверхности или геометрические высоты. Предусмотрена также возможность представления выходной продукции в коде ГРИБ для ее распространения по линиям связи. Выходная информация содержит около 200 наименований переменных, характеризующих состояние атмосферы, подстилающей поверхности и почвы, включая гидрологические характеристики типа поверхностного и грунтового стока.

Исчерпывающую информацию о структурах WRF-ARW и WRF-NMM, которые отличаются в деталях, можно найти в соответствующих Руководствах:

ARW Version 3 Modeling System User's Guide, April 2008, 214 pp.
http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users.

User's Guide for the NMM core of the Weather Research and Forecast (WRF) modeling system Version 2.1.
http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/docs/user_guide/index.php.

4. Эксперименты с моделями WRF-ARW и WRF-NMM

В 2009 г. в Гидрометцентре России были выполнены эксперименты по параллельному составлению прогнозов с заблаговременностью до 36 ч от срока 00 ВСВ по моделям ARW и NMM. С этой целью было выбрано 15 дней в июне—августе 2008 г., в которые наблюдалась интенсивная конвекция и связанные с ней сильные осадки и ветры. Начальные и граничные значения для обеих моделей брались из глобальных прогнозов по модели GFS (Global Forecasting System) NCEP, которые поступают в коде GRIB2 с разрешением 0,5°. Сведения

Book_Gidromet.indb Sec1:123 13.01.2010 13:13:23

о конфигурациях моделей, использовавшихся в численных экспериментах, приведены в таблице 1. Не считая динамического ядра и способа построения вложенных сеток, модели ARW и NMM отличались в проведенных экспериментах только параметризациями микрофизических процессов.

На внутренних сетках с шагом 3 км в обеих моделях параметризация конвекции отключалась, т.е. производилось прямое моделирование глубокой конвекции, что, собственно, и дает надежду на возможность прогнозирования сильных ливневых осадков и шквалистых ветров при интенсивной конвекции.

Основная цель экспериментов состояла в том, чтобы получить хотя бы ограниченную информацию о качестве краткосрочных прогнозов сильных осадков, ветра и града с помощью двух моделей. Проверочным материалом служили данные радиолокационных измерений комплексами АКСОПРИ и данные измерений на сети метеорологических станций каждые 3 ч. Для проверки качества модели использовалась информация о радиоэхо (РЭ) и радиолокационных осадках в период с 06 ВСВ до 18 ВСВ.

Выходная продукция из моделей получалась ежечасно, поэтому и радиолокационная информация использовалась с этим или более низким временным разрешением. Сравнение модельных и радиолокационных сумм осадков проводилось на полусуточном интервале, что обусловлено необходимостью сопоставления этих данных с измерениями на станциях.

Так как объемы информации очень велики, то сопоставлялись поля РЭ только вблизи земной поверхности. Для модельных данных это было РЭ на поверхности 950 гПа, а для радиолокационных измерений — РЭ на высоте 600 м над уровнем моря.

С тем, чтобы результаты сопоставления РЭ не были сильно зависимыми, сравнение их модельных и радиолокационных значений производилось через 3 ч: в 12, 15 и 18 ВСВ.

Качество прогнозирования зон мгновенных осадков средней и большой интенсивности (РЭ $\geq$ 20 дБZ и зон умеренных и больших суммарных осадков (Р $\geq$ 10 мм/12 ч) оценивалось объектно-ориентированным методом. В качестве «объектов» в данном случае служили области в которых значения РЭ и Р были более указанных выше пороговых значений. Так как разработка формального алгоритма выделения и сравнения объектов требует довольно много времени, объектно-ориентированный подход в его наиболее простом варианте был применен субъективно.

Book_Gidromet.indb Sec1:124 13.01.2010 13:13:23

Book_Gidromet.indb Sec1:125

Таблица 1

Конфигурации моделей WRF

Модель	Используемая глобальная модель	Внешняя сетка: шаг, размерность	Внутренняя сетка: шаг, размерность	Кол-во ур. по вертик.	ПА	РА	МЕ	ТРИ	ЗА	ЦИИ
					Микро-физика	КВ рад.	ДВ рад.	ПС	Пов. суши	Конвек-ция
ARW	GFS	dx=dy=9 км 335x397	dx=dy=3 км 463x547	38	Томпсон	Дудья	RRTM	Меллор-Ямада-Янич	Noah	Каин-Фритш[1]
NMM	GFS	dx = 0.081° (9 км) dy = 0.079° (9 км) 302x510	dx = 0.027° (3 км) dy = 0.029° (3 км) 490x916	38	Ферьер	Дудья	RRTM	Меллор-Ямада-Янич	Noah	Беттс-Миллер-Янич

[1] Параметризации применяются только на внешних сетках.

13.01.2010 13:13:23

С помощью системы визуализации «Изограф» [1] радиолокационные и модельные данные отображались на одном и том же бланке карты, на них выделялись объекты, в каждом объекте находился центр тяжести, а затем определялось расстояние между центрами тяжести ближайших объектов в радиолокационных и модельных данных и отличия в максимальных значениях в двух сравниваемых объектах. Если расстояние между наблюдавшимся и спрогнозированным объектами превышало 50км, то прогноз считался не имеющим методической ценности.

Для оценки успешности прогнозирования осадков использовались радиолокационные измерения на 6 комплексах АКСОПРИ: Москва (Крылатское), Калуга, Тверь, Валдай, Нижний Новгород и Смоленск, любезно предоставленные для этой цели Отделом радиометеорологии ЦАО.

Результаты сопоставления спрогнозированных и измеренных значений РЭ представлены в таблице 2. Здесь следует отметить, что по всем показателям лучшие результаты дает модель ARW. Особенно существенно, что она дает заметно меньший процент не оправдавшихся прогнозов и ложных тревог. Следует также обратить внимание на небольшие отличия между спрогнозированными и наблюдавшимися значениями РЭ.

В таблице 3 приведены оценки прогнозов сумм осадков с заблаговременностью до 18 ч. Здесь следует обратить внимание на то, что качество прогноза суммарных осадков по обеим моделям уступает качеству прогноза РЭ: процент не оправдавшихся прогнозов вырос на 9—18%, имеется значительная положительная смещенность модельных осадков относительно радиолокационных. Она меньше для модели ARW, чем для NMM.

Для анализа причин смещенности модельных осадков относительно радиолокационных было произведено сопоставление сумм осадков за 12 ч по станционным и радиолокационным измерениям при количестве осадков на станциях $P \geq 10$ мм/12 ч. Количество таких станционных измерений, попавших в поле радиолокационных измерений, составило 145. Смещенность станционных измерений относительно радиолокационных составила 8 мм/12 ч. Одной из причин положительной смещенности модельных и станционных осадков относительно радиолокационных может быть ослабление радиоизлучения на длине волны 3 см в интенсивных осадках.

При проверке качества прогнозирования сильных ветров ($V \geq 10$ м/с) оказалось, что подавляющее большинство данных о сильных ветрах помещается в сводках СИНОП в группе «погода между сроками», поэтому синхронные сопоставления расчетов и наблюдений

Book_Gidromet.indb Sec1:126 13.01.2010 13:13:24

Book_Gidromet.indb Sec1:127

Таблица 2

**Сравнение модельных значений радиоэха (РЭ)
на поверхности 950 гПа с одновременными значениями РЭ,
измеренными с помощью радиолокаторов (МРЛ) на высоте 600 м от уровня моря**

Модель	Общее число случаев	МРЛ да, модель нет	Модель да, МРЛ нет	Модель да, МРЛ да	Среднее расстояние между зонами РЭ>20 дБZ в модели и по данным МРЛ	Среднее отличие максимального РЭ в модели и по радиолокационным измерениям: РЭмод - РЭмрл
ARW	1005 100%	186 18,5%	112 11,5%	707 70%	18 км	1,5 дБZ
NMM	758 100%	179 24,0%	110 14,5%	469 61,5%	20,6 км	1,5 дБZ

Примечание. «МРЛ да, модель нет»: зона РЭ>20 дБZ отмечалась МРЛ, но ближайшая зона с РЭ>20 дБZ находилась в модельном поле на расстоянии >50 км от наблюдавшейся. «Модель да, МРЛ нет» имеет обратный смысл. «Модель да, МРЛ да» обозначает, что ближайшие зоны РЭ>20 дБZ в модели и радиолокационных измерениях находились на расстоянии ≤ 50 км друг от друга.

13.01.2010 13:13:24

Book_Gidromet.indb Sec1:128

Таблица 3

Сравнение модельных прогнозов осадков на 06-18 ВСВ с радиолокационными оценками осадков

Модель	Общее число случаев	МРЛ да, МРЛ нет	Модель да, МРЛ нет	Модель да, МРЛ да	Среднее расстояние между зонами осадков в модели и по оценкам МРЛ	Среднее отличие в количестве максимальных смоделированных и радиолокационных осадков Рмод – Рмрл (мм/12 ч)
ARW	236 100%	21 9%	70 29,5%	145 61,5%	20 км	10,8
NMM	157 100%	24 15,3%	67 42,7%	66 42%	21,7 км	15,7

Примечание. Сравнивались зоны осадков Р≥10 мм/12 ч. Смысл заголовков в таблице такой же, как и в табл. 2.

Таблица 4

Оценка качества прогнозов на 06-18 ч ветров со скоростью ≥ 10 м/с

Модель	Общее число случаев	Число не оправдавшихся прогнозов	Число ложных тревог	Число оправдавшихся прогнозов	Смещенность Прогнозов скорости Vмод -Vстанц	Среднее расстояние между наблюдавшимся и спрогнозированным положением ветра С V>10 м/с
ARW	269 100%	103 38,3%	63 23,4%	103 38,3%	–3,6 м/с	14,5 км
NMM	165	85 51,5%	36 21,8%	44 26,7%	–3,8 м/с	9,5 км

13.01.2010 13:13:25

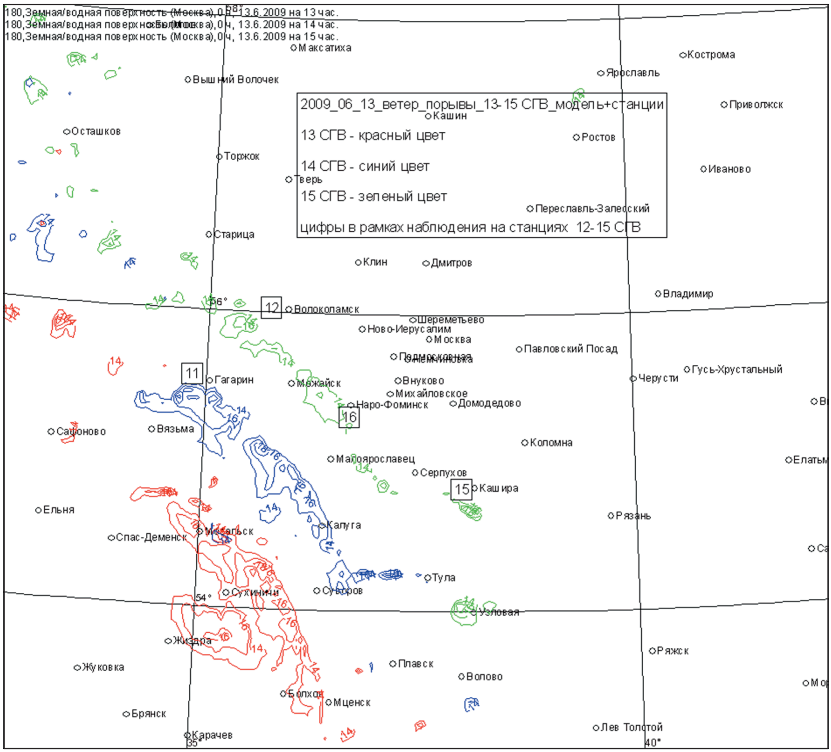


Рис. 1. 2009-06-13 ветер 13—15 СГВ модель+станции.

практически невозможны из-за очень малого количества синхронных данных. В этой связи наблюдения между сроками 9 и 12 ВСВ сравнивались с прогнозами по моделям на 12 ВСВ, наблюдения на отрезке 12—15 ВСВ — с прогнозами на 14 ВСВ, а наблюдения на отрезке 15—18 ВСВ — с прогнозами на 16 ВСВ. Эти отрезки времени были выбраны исходя из того, что в период с 12 ВСВ до 18 ВСВ бывает наиболее сильно развита конвекция и связанные с ней сильные ветры.

В таблице 4 приведены результаты такого рода сопоставлений прогнозов сильных ветров на уровне 10 м по обеим моделям. Классификация прогнозов на не оправдавшиеся, ложные тревоги и методически полезные проводилась по тому же принципу, как и для осадков. Из данных, приведенных в этой таблице, следует, что процент методически полезных прогнозов невелик, и имеется довольно большая отрицательная смещенность прогностических значений

Book_Gidromet.indb Sec1:129 13.01.2010 13:13:25

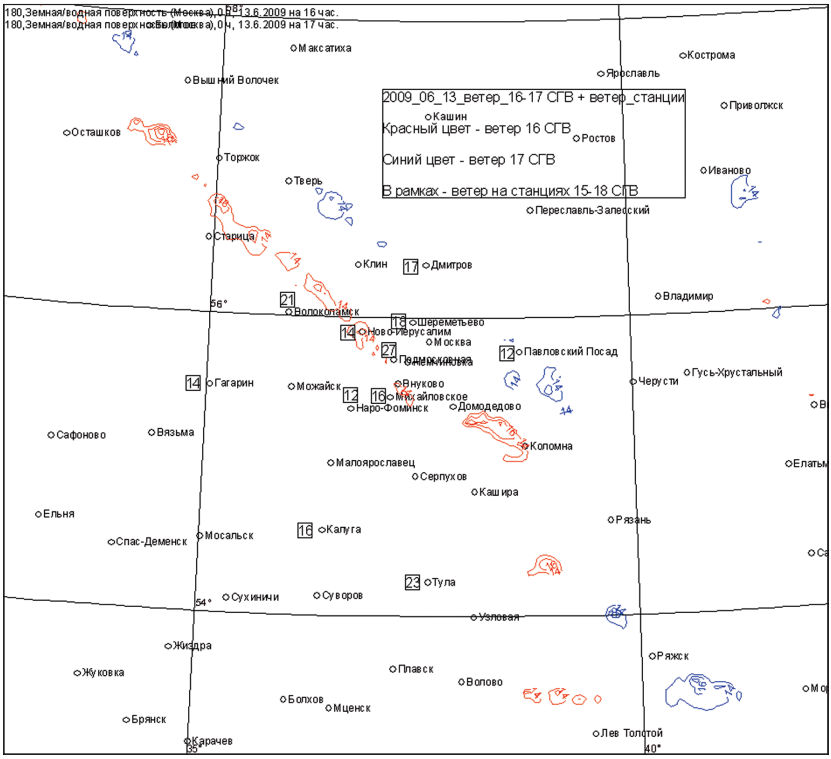


Рис. 2. 2009-06-13 ветер 16—17 СГВ + ветер станции.

относительно наблюдавшихся, т.е. на сетках с шагом 3—5 км сильные ветры вблизи поверхности земли воспроизводятся моделями посредственно. Этот недостаток в значительной мере связан с низким разрешением вычислительной сетки. В экспериментах авторов (Вельтищев, Жупанов [2]) с параллельными расчетами на сетках с шагом 1 км и 3 км было получено, что максимальные скорости ветра при интегрировании модели на сетке с шагом 3 км составляют $\cong 0{,}8$ от максимальных скоростей при расчетах на сетке с шагом 1 км.

Провести оценку успешности прогнозирования града на удалось. За все 15 дней, отобранных для анализа, станциями было зафиксировано только 2 случая града, а области с градом в модели имеют очень малые площади, поэтому для получения какой-либо статистики ошибок прогноза града по наблюдениям на станциях необходим длительный ряд прогнозов.

Book_Gidromet.indb Sec1:130 13.01.2010 13:13:26

В связи с более низким качеством прогнозов по модели NMM составление прогнозов по ней было прекращено, а по модели ARW прогнозы на сетке с шагом 3 км и заблаговременностью до 72 ч продолжают составляться на территории ЕТР на регулярной основе.

В качестве примера на рис. 1 и рис. 2 приведен прогноз положения областей сильных ветров ($V \geq 14$ м/с) 13 июня 2009 г от 12 до 17 ВСВ по модели ARW. Для сравнения на рис. 1 в рамках указаны большие скорости ветра, отмеченные на станциях в период с 12 ВСВ до 15 ВСВ, а на рис. 2 — в период с 15 ВСВ до 18 ВСВ. Из информации, содержащейся на этих рисунках, видно, что модель неплохо спрогнозировала перемещение зоны сильных ветров, но значения максимальных спрогнозированных скоростей были меньше наблюдавшихся.

5. Заключение

На основании проверки качества краткосрочного прогнозирования сильных осадков и ветров у поверхности земли моделями WRF-ARW и WRF-NMM на материалах лета 2008 г. можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Обе модели достаточно хорошо воспроизводят мезомасштабные структуры течений, связанные к глубокой конвекцией, но обнаруживают одни и те же недостатки. Переоценивается количество сильных осадков и занимаемая ими площадь. Последнее вытекает косвенно из заметного превышения процента ложных тревог по отношению к проценту не оправдавшихся прогнозов. Недооценивается скорость сильных ветров, и не оправдавшиеся прогнозы преобладают над ложными тревогами, т.е. зоны сильных ветров достаточно часто моделями не воспроизводятся.

2. Перечисленные выше недостатки в большей степени присущи модели NMM.

3. Недостатки прогнозов обусловлены, по крайней мере частично, достаточно грубой для разрешения глубокой конвекции сеткой (3 км). Это неизбежно приводит к смещению частот модельных объектов в сторону их более низких значений. Переход на более мелкие сетки (500—1000 м) может повысить качество прогноза сильных осадков и ветров.

4. Для автоматизированной оценки качества прогнозов опасных явлений, имеющих большую пространственно-временную изменчивость, необходимо создание объектно-ориентированных методик оценки численных прогнозов погоды.

Book_Gidromet.indb Sec1:131 13.01.2010 13:13:27

ЛИТЕРАТУРА
1. *Алферов Ю.В.* Автоматизированная графическая система для визуализации результатов численных прогнозов // Труды Гидрометцентра, 2003, вып. 338. С. 119—124.
2. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология, 2008, № 9. С. 30—44.
3. ARW version 3 Modeling System User's Guide, April 2008. 214 p. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users
4. *Betts A.K.* A new convective adjustment scheme. I: Observational and theoretical basis // Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1986, Vol.112, No. 473. P. 667—691.
5. *Betts A.K. and Miller M.J.* A new convective adjustment scheme. II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass sets. // Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1986, Vol.112, No 473. P. 693—709.
6. *Chen F.* et al. Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. // J. Geoph. Res., 1996, Vol. 101, No. D3. P. 7251—7268.
7. *Chen F., Janjic Z. and Mitchell K.* Impact of atmospheric surface layer parameterizations in new land-surface scheme of the NCEP Mesoscale Eta model. // Boundary-Layer Meteor., 1997, Vol. 85, No. 3. P. 391—421.
8. *Chen F. and Dudhia J.* Coupling an advanced land-surface hydrology model with the Penn State – NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. // Mon. Wea. Rev., 2001, Vol. 129, No. 4. P. 569—585.
9. *Collins W.D.* et al. Description of NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). – NCAR Technical Note, NCAR/TN-464+STR, 2004, 226 pp.
10. *Cooper W.A.* Ice initiation in natural clouds. Precipitation enhancement – a scientific challenge // Meteor. Monogr., 1986, No. 43, Amer. Meteor. Soc. P. 29—32.
11. *Deardorff J.W.* Theoretical expression for countergradient vertical flux. // J. Geoph. Res., 1972, Vol. 77, pp. 5900—5904.
12. *Dudhia J.* Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. // J. Atmos. Sci., 1989, Vol. 46, No. 20. P. 3077—3107.
13. Ek M.B. et al. Implementation of Noah land surface model advances in National Centers for Environmental Prediction operational Mesoscale Eta model. // J. Geoph. Res., 2003, Vol. 108, No. D22, 8851.
14. *Fels S.B. and Schwarzkopf M.D.* The simplified exchange approximation: a new method for radiative transfer calculations. // J. Atmos. Sci., 1975, Vol. 32, No. 7. P. 1475—1488.
15. *Ferrier B.S.* et al. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in NCEP Eta model. – Preprints, 15th Conference on numerical weather prediction, 2002, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc. P. 280—283.
16. *Fletcher N.H.* The physics of rain clouds. // Cambridge University Press, 1962, 390 pp.
17. *Grell G.A. and Deveny D.* A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques // Geoph. Res. Let., 2002, Vol. 29, No. 4, Article 1693.
18. *Holstlag A.A. and Boville B.A.* Local versus non-local boundary layer diffusion in a global climate model. // J. of Climate, 1993, Vol. 6, No. 10. P. 1825—1842.
19. *Hong S.-Y. and Pan H.-L.* Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium Range Forecast model. // Mon. Wea. Rev., 1996, Vol. 124, No. 10. P. 2322—2329.
20. *Hong S.-Y., Dudhia J. and Chen S.-H.* A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. // Mon. Wea. Rev., 2004, Vol.132, No. 1. P. 103—120.

Book_Gidromet.indb Sec1:132 13.01.2010 13:13:27

21. *Houze R.A.* et al. Size distributions of precipitation particles in frontal clouds // J. Atmos. Sci., 1979, Vol. 36, No. 1. P. 156—162.
22. *Ikawa M. and Saito K.* Description of nonhydrostatic model development at research department of the MRI, 1991, No. 28.
23. *Jacquemin B. and Noilhan J.* Sensitivity study and validation of land surface parameterization using HAPEX-MOBILE data set. // Boundary-Layer Meteor., 1990, Vol. 52, No. 1—2. P. 93—134.
24. *Janjic Z.I.* The step-mountain Eta coordinate model: Future developments of convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. // Mon. Wea. Rev., 1990, Vol. 122, No. 5. P. 927—945.
25. *Janjic Z.I.* The surface layer in the NCEP Eta model // 11th Conf. on NWP, 1996, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc.. P. 354—355.
26. *Janjic Z.I.* Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, 2002, No. 437, 61 pp.
27. *Janjic Z.I.* A nonhydrostatic model based on new approach // Meteorol. Atmos. Phys., 2002, Vol. 82, No. 1. P. 271—285.
28. *Janjic Z.I.* The WRF NMM core. Overview of basic principles (presented by T. Black). NCEP, August 2006, 74 pp. – http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/docs.
29. *Janjic Z.I., Gerriti J. P., Nickovic S.* An alternative approach to nonhydrostatic modeling. // Mon. Wea. Rev., 2001, Vol. 129, No. 5. P. 1164—1178.
30. *Kain J.S.* The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. // J. Appl. Meteor., 2004, Vol. 43, No. 1. P. 170—181.
31. *Kain J.S. and Fritsch J.M.* A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization // J. Atmos. Sci., 1990, Vol. 47, No. 1. P. 2784—2802.
32. *Kain J.S. and Fritsch J.M.* Convective parameterization for Mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The presentation of cumulus convection in numerical models // Meteor. Monogr., 1993, No. 24, Amer. Meteor. Soc.. P. 165—170.
33. *Kasahara A.* Various vertical coordinate systems used for numerical weather prediction // Mon. Wea. Rev, 1974, Vol. 102, No. 7. P. 509—522.
34. *Kessler E.* On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations // Meteor. Monogr., No. 32, 1969, Amer. Meteor. Soc., 84 pp.
35. *Klemp J.B. and Wilhelmson R.B.* Simulations of three-dimensional convective storm dynamics // J. Atmos. Sci., 1978, Vol. 35, No. 6. P. 1070—1096.
36. *Klemp J.B., Skamarock W.C., Dudhia J.* Conservative split-explicit time integration methods fort the compressible nonhydrostatic equations. Draft manuscript. WRF Eulerian prototype model equations height and mass vertical coordinates // NCAR, Boulder, Colorado, 24 October 2000, 14 pp.
37. *Lacis A. and Hansen J.E.* A parameterization of solar radiation in the Earth's atmosphere // J. Atmos. Sci., 1974, Vol. 31, No. 1. P. 118—133.
38. *Laprise R.* The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable // Mon. Wea. Rev., 1992, Vol. 120, No. 1. P. 197—207.
39. *Lilly D.K.* On the numerical simulation of buoyant convection // Tellus, 1962, Vol. 14. P. 148—172.
40. *Lin Y.-L.* et al. Bulk parameterization of the snow field in cloud model // J. Appl. Meteor., 1983, Vol. 22, No. 6. P. 1065—1092.
41. *Lobocki L.* A procedure for derivation of the surface-layer-bulk relationships from simplified second order closure models // J. Appl. Meteor., 1993, Vol.32, No. 1. P. 126—138.
42. *Lord S.J., Willoughby H. E. and Piotrovicz J. M.* Role of parameterized ice-phase microphysics in an axisymmetric, nonhydrostatic tropical cyclone model // J. Atmos. Sci., 1984, Vol. 41, No. 19. P. 2836—2848.

Book_Gidromet.indb Sec1:133 13.01.2010 13:13:27

43. *Mahrt L. and Ek M.* The influence of atmospheric stability on potential evaporation // J. Clim. Appl. Meteor. 1984, Vol. 23, No. 2. P. 222—234.
44. *Mahrt L. and Pan H.L.* A two-layer model of soil hydrology // Boundary-Layer Meteor., 1984, Vol. 29, No. 1. P. 1—20.
45. *McCumber M.* et al. Comparison of ice-phase microphysical parameterization schemes using numerical simulations of tropical convection. // J. Appl. Meteor., 1991, Vol. 30, No. 7. P. 985—1004.
46. *Mellor G.L. and Yamada T.A.* A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. Atmos. Sci., 1974, Vol. 31, No. 31. P. 1791—1806.
47. *Mellor G.L. and Yamada T.* Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems. // Rev. Geoph. Space Phys., 1982, Vol. 20. P. 851—875.
48. *Mlawer E.J.* et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated –k model for the longwave. // J. Geoph. Res., 1997, Vol. 102, No. D14. P. 16663—16682.
49. *Miyakoda K. and Sirutis J.* Manual of the E-physics, 1986 (Available from Geoph. Fluid Dyn. Lab., Princeton University, P.O. Box 308, Princeton, NJ08542).
50. *Morrison H.* et al. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description. // J. Atmos. Sci., 2005, Vol. 62, No. 6. P. 1665—1677.
51. *Morrison H. and Pinto J.O.* Intercomparison of bulk microphysics schemes in mesoscale simulations of springtime Arctic mixed-phase stratiform clouds. // Mon. Wea. Rev., 2006, Vol. 134, No. 7. P. 1880—1900.
52. *Morrison H.* at al. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes // Mon. Wea. Rev., 2009, Vol. 137, No. 3. P. 991—1007.
53. *Noh Y., Cheon W.G. and Raasch S.* The improvement of the K-profile model for the PBL models // Seoul, 2001, South Korea, Laboratory for Atmospheric Modeling Research. P. 65—66.
54. *Noilhan J. and Planton S.* A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. // Mon. Wea. Rev., 1989, Vol. 117, No. 3. P. 536—549.
55. *Ogura Y. and Cho H.-R.* Diagnostic determination of cumulus cloud populations from observed large-scale variables // J. Atmos. Sci., 1973, Vol. 30, No. 7. P. 1276—1286.
56. *Pan H.L. and Mahrt L.* Interaction between soil hydrology and boundary layer developments. // Boundary-Layer Meteor., 1987, Vol. 38, No. 1—2. P. 185—202.
57. *Paulson C.A.* A mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. // J. Appl. Meteor., 1970, Vol. 9, No. 6. P. 857—861.
58. *Pleim J.E.* A simple, efficient solution of flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. // J. Appl. Meteor. Clim., 2006, Vol. 45, No. 2. P. 341—347.
59. *Pleim J.E.* A combined local and non-local closure model for the atmospheric boundary layer. Part 1: Model description and testing. // J. Appl. Meteor. Clim., 2007, Vol. 46, No. 9. P. 1383—1395.
60. *Pleim J.E. and Xiu A.* Development and testing of surface flux and planetary boundary layer model for application in Mesoscale models. // J. Appl. Meteor., 1995, Vol. 34, No. 1. P. 16—32.
61. *Reisner J., Rasmussen R. M. and Bruintjes R. T.* Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. // Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1998, Vol. 124, No. 548. P. 1071—1107.
62. *Ruttledge S.A. and Hobbs P.V.* The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Part VIII: A model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands. // J. Atmos. Sci., 1983, Vol.40, No.5. P. 1185—1206.
63. *Ruttledge S.A. and Hobbs P.V.* The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Part XII: A diagnostic modeling study of

Book_Gidromet.indb Sec1:134 13.01.2010 13:13:28

precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands. // J. Atmos. Sci., 1984, Vol. 41, No. 20. P. 2949—2972.
64. *Schaake J.V.* et al. A simple water balance model (SWB) for estimating runoff at different spatial and temporal scales. // J. Geoph. Res., 1996, Vol.101, No. D3. P. 7461—7475.
65. *Schwarzkopf M.D. and Fels S.B.* Improvements of the algorithm for computing CO2 transmissivities and cooling rates. // J. Geoph. Res., 1985, Vol. 90, No. D6. P. 10541—10550.
66. *Schwarzkopf M.D. and Fels S.B.* The simplified exchange method revisited: an accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. // J. Geoph. Res., 1991, Vol. 96, No. D5. P. 9075—9096.
67. *Skamarock W.C.* Time splitting techniques for multidimensional transport, 2005, 26 pp. Available at http://www.mmm..ucar.edu/individual/skamarock/advect3d-2005.pdf
68. *Skamarock W.C.* et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3. // NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008, 125 pp.
69. *Smirnova T.G.* et al. Performance of different soil model configurations in simulating ground surface temperature and surface fluxes // Mon. Wea. Rev., 1997, Vol. 125, No. 8. P. 1870—1884.
70. *Smirnova T.G.* et al. Parameterization of cold-season processes in the MAPS land-surface scheme // J. Geoph. Res., 2000, Vol. 105, No. D3. P. 4077—4086.
71. *Tao W.-K. and McCumber M.* An ice-water saturation adjustment // Mon. Wea. Rev., 1989, Vol. 117, No.1. P. 231—235.
72. *Tao W.-K. and Simpson J.* The Goddard cumulus ensemble model. Part I Model Description // Terr. Atmos. Oceanic Sci., 1993, Vol. 4. P. 35—72.
73. *Tao W.-K.* et al. Microphysics, radiation and surface processes in the Goddard cumulus ensemble (GCE) model. Meteor. and Atmos. Phys., 2003, Vol. 82. P. 97—137.
74. *Thompson G., Rasmussen R. M. and Manning K.* Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis // Mon. Wea. Rev., 2004, Vol. 132, No. 2. P. 519—642.
75. *Tripoli G.J. and Cotton W.R.* A numerical investigation of several factors contributing to the observed variable intensity of deep convection over south Florida. // J. Appl. Meteor., 1980, Vol. 19, No. 9. P. 1037—1063.
76. User's Guide for NMM core of Weather Research and Forecasts (WRF) modeling system version 2.1 (view complete document in pdf), 2006, 94 pp. http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/user_guide/index.php
77. *Walko R.L.* et al. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single moment scheme // Atmos. Res., 1995, Vol. 38. P. 29—62.
78. *West R.D., Crisp D. and Chen L.* Mapping transformations for broad-band atmospheric radiation calculations. // J. Quart. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1990, Vol. 43. P. 191—199.
79. *Wicker L.J. and Skamarock W.C.* Time splitting methods for elastic models using forward time schemes // Mon. Wea. Rev., 2002, Vol. 130, No. 8. P. 2088—2097.
80. *Xiu A. and Pleim J.E.* Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorology model // J Appl. Meteor., 2001, Vol. 40, No. 2. P. 192—209.
81. *Xu Q.* A formula for eddy viscosity in the presence of moist symmetric instability // J. Atmos. Ski., 1988, Vol. 45, No. 1. P. 5—8.
82. *Zilitinkevich S.* Non-local turbulent transport: Pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows // Air Pollution Theory and Simulation, Air Pollution III. H. Power, N. Houssiopoulos, and C.A. Brebbia, Eds., 1995, Vol. 1, Computational Mechanics Publications. P. 53—60.

Гидродинамический краткосрочный прогноз погоды в пунктах

Л.В. Беркович, Ю.В. Ткачёва
Гидрометцентр России

Обсуждаются современные возможности оперативного гидродинамического прогноза метеорологических величин и характеристик погоды в пунктах и их успешности. Развитие геофизической гидродинамики, вычислительной техники и методов параметризации физических процессов диктует необходимость перехода к детальным оперативным гидродинамическим прогнозам погоды в пунктах. Успешность гидродинамических прогнозов, их детальность и объективность открывают перспективу повышения точности прогнозов погоды в пунктах.

Гидродинамический краткосрочный прогноз погоды (ГКПП) соединил в себе достижения геофизической гидродинамики, вычислительной математики и техники и эффективного учета физических процессов в атмосфере. Определяющее значение для успешности гидродинамических прогнозов погоды имеет точность и полнота исходной информации, т.е. результаты многоэлементного анализа стандартной метеорологической информации на разных уровнях в атмосфере.

Современные возможности вычислительной техники, позволяют применять все более высокое горизонтальное (3—5 км) и вертикальное (50 и более уровней) разрешение в прогностических моделях. Конечно, погодообразующие процессы имеют значительно больший (синоптический) масштаб. Но стремление применять точные параметризации физических процессов, детальную структуру рельефа земной поверхности и ее теплофизических характеристик создают необходимость высокого разрешения в моделях, без чего невозможно прогнозировать суточный ход метеорологических величин в пунктах. В то же время для использования в оперативной практике необходимо разумное соответствие между пространственным разрешением и временем интегрирования модели для выдачи результатов прогноза в сжатые оперативные сроки. Поэтому для прогнозов в пунктах требуется определить необходимое разрешение в прогностической модели, отвечающее потребности

Book_Gidromet.indb Sec1:136 13.01.2010 13:13:29

обеспечения прогнозами, как отдельных пунктов, так и мегаполисов. В среднем, можно считать, что для пунктов типа небольшого города приемлемым разрешением является 10—15 км, которое соответствует репрезентативности измерений на синоптических станциях. Для больших городов необходимо рассчитывать прогнозы для разных районов города.

Современный гидродинамический краткосрочный прогноз погоды в пунктах достиг такого уровня развития и успешности, что фактически является основным источником прогностической информации для прогнозов общего назначения. На различных погодных сайтах представлена прогностическая информация ГКПП с разрешением по времени 3 или 6 ч. Гидродинамический краткосрочный прогноз, рассчитанный в моделях атмосферы разного масштаба (от глобальных до мезомасштабных), представляет детальную по времени прогностическую метеоинформацию. Он включает следующие величины и характеристики явлений погоды в пунктах: давление, температуру, влажность, ветер, облачность и осадки, метели, гололед и др. По мере развития гидродинамических методов анализа и прогноза метеорологических полей, а также развития самой геофизической гидродинамики все более повышается точность, и расширяется круг предсказываемых ГКПП характеристик и явлений погоды. Потребности оперативной практики в прогнозах температуры воздуха, относительной влажности, скорости и направления ветра и скорости при порывах, количества облачности трех ярусов — нижнего, среднего и верхнего, количества обложных и конвективных осадков, прогнозов турбулентного режима в пограничном слое для решения экологических задач определяют практическую направленность создания оперативных технологий ГКПП. Они соответствуют современным возможностям и достигнутому прогрессу науки о прогнозе погоды.

Оперативные методы (технологии) расчетов ГКПП до последних лет служили вспомогательным материалом для синоптиков-прогнозистов, формулировавших окончательный текст прогноза погоды. Достигнутые результаты ГКПП предоставляют возможность перейти к новому этапу формулировки прогнозов погоды общего назначения непосредственно в форме гидродинамических прогнозов погоды, которые являются объективными, количественными и детерминированными.

Для ГКПП в разных странах используются различные гидродинамические модели. Примером этого являются варианты

Book_Gidromet.indb Sec1:137 13.01.2010 13:13:29

мезомасштабных моделей MM5, WRF, ETA-модели, разработанные в прогностических центрах NCAR и NCEP (США), мезомасштабная модель Гидрометцентра России и др. [10, 17]. Перспективность использования этих моделей несомненна.

В Гидрометцентре России создана оптимально функционирующая оперативная технология ГКПП с использованием уточненных методов описания турбулентных процессов в пограничном слое, радиационного и конденсационного теплообмена в атмосфере, параметризации процессов конвективного облакообразования и ливневых осадков для гидродинамического краткосрочного прогноза погоды в пунктах [4, 5, 11—14]. Данная методика ГКПП была утверждена Центральной Методической Комиссии по гидрометеорологическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета в 2000 г. [5].

В настоящее время оперативные технологии позволяют рассчитывать, прогнозы в пунктах на сроки до 48—72 ч для территории Евразии следующих метеовеличин и характеристик погоды (включая их суточный ход с заданной дискретностью, например, 1 или 3 ч):

- приземные метеовеличины (атмосферное давление, температура воздуха, относительная влажность и ветер — скорость, направление и скорость при порывах);

- балл облачности трех ярусов (нижнего, среднего и верхнего), суммы обложных и конвективных осадков (в мм/12 ч.);

- геопотенциал, температура, дефицит точки росы, скорость и направление ветра на основных изобарических поверхностях, вертикальные профили температуры, влажности, ветра и коэффициента атмосферной турбулентности и других турбулентных характеристик в нижнем трехкилометровом слое атмосферы.

Оценки успешности ГКПП в настоящее время превосходят точность прогнозов метеорологических величин, которые предсказываются качественными методами. Объем и детальность прогностической информации ГКПП не сопоставимы с синоптическими прогнозами. Такие элементы погоды, как количество осадков, балл облачности различных ярусов, скорость и направление приземного ветра, его порывов и распределение в пограничном слое возможно определить лишь на основе гидродинамических расчетов.

Это же относится к описанию суточного хода всех характеристик и элементов погоды и оперативного контроля успешности гидродинамических прогнозов на основе всей доступной стандартной

Book_Gidromet.indb Sec1:138 13.01.2010 13:13:29

метеорологической информации, измеряемой на сети метеорологических станций.

Следует отметить, что здесь говорится о прогнозах общего назначения. Прогнозы опасных явлений и специализированные прогнозы здесь не рассматриваются, поскольку для них разрабатываются соответствующие методики. Рассмотрим успешность гидродинамических и синоптических прогнозов температуры и осадков.

В таблице 1 приведены данные об успешности минимальной и максимальной температуры воздуха для станции ВВЦ в Москве за 2008 г., прогнозируемые синоптиками Московского Гидрометеорологического Бюро (МГМБ) и ГКПП. Из таблицы видно, что преимуществ синоптические прогнозы не имеют. А других прогностических температур в синоптических прогнозах нет. Практическое совпадение оценок успешности доказывает, на наш взгляд, что синоптические прогнозы зависят от результатов ГКПП прогностических моделей основных метеоцентров. Для гидродинамических же прогнозов основной задачей является расчет температуры воздуха на каждом шаге интегрирования по времени. При этом для прогнозов температуры в конкретные сроки, например в сроки наблюдений температуры на метеостанции, требуется большая точность, чем для прогнозов экстремальной температуры, т.к. необходимо определить точное значение температуры и срок ее наступления.

Таблица 1

Успешность прогнозов минимальной и максимальной температуры воздуха Московского ГМБ и ГКПП для станции ВВЦ за январь—декабрь 2008 г.

Прогноз	T_{min}				T_{max}			
	АО	СО	ОО	ОН %	АО	СО	ОО	ОН %
МГМБ	1,2	0,3	0,53	97	1,4	–0,1	0,57	96
ГКПП	1,2	0,1	0,54	97	1,3	0,1	0,56	96

Здесь АО — абсолютная ошибка;
СО — систематическая ошибка;
ОО — относительная ошибка;
ОН — ошибка по Наставлению по оценке прогнозов.

Book_Gidromet.indb Sec1:139 13.01.2010 13:13:30

Таблица 2

Успешность прогноза осадков за январь—декабрь 2008 г.

		АО	СО	КПО	ОПР	ПРОС	ПРБОС	ОН
ТД	ГМБ	0,8	0,1	0,40	70	76	64	85
	ГКПП	1,0	0,0	0,48	74	92	56	80
СН	ГМБ	0,8	0,0	0,42	71	76	62	84
	ГКПП	0,9	0,0	0,49	73	90	59	80
СД	ГМБ	0,9	0,1	0,39	70	74	67	85
	ГКПП	1,0	0,2	0,37	68	90	65	76

Здесь АО — абсолютная ошибка;
СО — систематическая ошибка;
КПО — критерий Пирса-Обухова;
ОПР — оправдываемость прогноза осадков;
ПРОС — предупрежденность осадков;
ПРБОС — предупрежденность без осадков;
ОН — оценка по «Наставлению».
ТД, СН, СД — текущий день, следующая ночь, следующий день.

В таблице 2 приведены оценки успешности прогноза осадков.

Из таблицы 2 видно, что гидродинамические прогнозы осадков имеют явное преимущество по критерию Пирса-Обухова, оправдываемости и предупрежденности осадков, при практическом равенстве других характеристик успешности прогнозов осадков. Но, несмотря на это, оценка по «Наставлению» у синоптических прогнозов выше. Это явно показывает, что в оценке по «Наставлению» не учитываются существенные параметры, которые являются важными в оценке успешности прогнозов осадков.

Для оценки оперативных прогнозов влажности воздуха, облачности (обложной и конвективной), скорости и направления ветра, его порывов и других параметров, прогнозируемых ГКПП в сроки наблюдений на метеостанциях, необходимо принять согласованную систему их оценки. Оперативно рассчитываемые ГКПП на основе технологии, описанной в [5, 11—14] усовершенствованы путем использования нового варианта модели атмосферного пограничного слоя [2, 3, 15], ветра и его порывов, конвективной облачности и осадков [16]. ГКПП доказывают возможность детального прогноза в пунктах основных метеовеличин, а также явлений погоды, что всегда

Book_Gidromet.indb Sec1:140 13.01.2010 13:13:30

было прерогативой синоптических прогнозов. Вычислительные ресурсы оперативных ПК обеспечивают все необходимые расчеты прогноза в сжатые сроки оперативной работы.

Все сказанное выше подтверждается испытаниями, проведенными в Гидрометцентре России в 2007—2008 гг. на оперативных данных объективного анализа. Целью испытаний было сравнение точности прогнозов десяти различных моделей от глобальных до мезометеорологических [1, 7]. Побочный результат этих испытаний состоит в том, что они показали возможности ГКПП давать для любых территорий детальные по времени прогнозы элементов и характеристик погоды, точность и объективность которых превосходит стандартные прогнозы общего назначения.

Ниже приведены примеры гидродинамических прогнозов погоды в пунктах (таблица 3), оперативно рассчитываемых на основе описанной технологии.

Они иллюстрируют возможности детального прогноза в пунктах основных метеовеличин, а также явлений погоды. Для пунктов Центрального Федерального Округа детальные прогнозы передаются в требуемые оперативные сроки, а также поступают на сайт Гидрометцентра России. Новая вычислительная техника, которая будет вскоре использоваться в Гидрометцентре России для оперативных прогнозов, позволит еще больше расширить возможности ГКПП.

Как видно из таблицы 3, гидродинамические прогнозы, кроме непосредственно расчетов температуры воздуха, относительной влажности скорости и направления ветра, балла облачности трех ярусов, суммы обложных и конвективных осадков (в мм/12 ч) и др., прогнозируют основные явления погоды: интенсивность осадков, метели и гололед (гололедица), грозы и порывы ветра. Успешность приведенных примеров прогнозов метеовеличин находится в соответствии с результатами проведенных испытаний [6, 8, 9]. Оправдываемость явлений погоды в этих таблицах оценивалась альтернативно (наличие или отсутствие явлений). В рассматриваемых случаях имел место указанный в прогнозах характер развития явлений погоды в пунктах, что отмечалось при наблюдениях на метеорологических станциях.

Роль современного прогнозиста должна заключаться в том, чтобы эффективно и максимально использовать результаты гидродинамических прогнозов без субъективной корректировки. Это будет способствовать, как указывал И.А. Кибель 50 лет назад, «ускорению перехода на составление прогнозов погоды от начала до конца гидродинамическими методами».

Book_Gidromet.indb Sec1:141 13.01.2010 13:13:31

Таблица 3

Прогноз погоды в г. Москве

Время	Темпер.	Ветер			Осадки	Облачность			Погодные явления
ВСВ ч	°С	Скор. м/с	Напр. град	Пор. м/с	мм/3 ч	Ниж.	Сред.	Общ.	
						баллы			
15.01.08									
3	–1,7	1,2	254	5	0,1	3	4	6	Слабый снег
6	–2,3	1,0	232	4	0,1	5	6	8	Слабый снег
9	–1,5	0,8	208	4	0,0	7	7	9	Слабый снег
12	–1,3	0,7	186	5	0,2	9	7	10	Слабый снег
15	–1,6	0,8	178	5	0,8	10	9	10	Снег
18	–1,8	1,3	171	5	1,0	10	8	10	Снег
21	–2,3	1,4	163	3	1,2	10	8	10	Снег
24	–3,4	1,6	148		0,3	10	10	10	Слабый снег
16.01.08									
3	–3,7	1,8	220		0,1	10	9	10	Слабый снег
6	–4,1	1,6	342	5	0,0	10	8	10	Слабый снег
9	–3,3	1,9	348	6	0,2	10	8	10	Слабый снег
12	–2,9	2,1	6	6	0,2	10	9	10	Слабый снег
15	–3,8	2,3	3	7	0,1	10	8	10	Слабый снег
18	–4,6	2,8	12	6	0,1	10	9	10	Слабый снег
21	–5,9	2,6	19	5	0,0	10	8	10	
24	–6,7	2,7	14	5		10	8	10	

Book_Gidromet.indb Sec1:142 13.01.2010 13:13:31

Прогноз погоды в г. Липецке

Время	Темпер.	Ветер			Осадки	Облачность			Погодные явления
МСВ ч	°С	Скор. м/с	Напр. град	Пор. м/с	мм/3 ч	Ниж.	Сред.	Общ.	
						баллы			
16.01.09									
0	0,3	2,5	237	6,9	0,1	10	8	10	Слабый снег
3	–0,3	2,4	250	7,0	0,2	10	7	10	Слабый снег
6	–0,7	1,7	281	5,8	0,2	10	8	10	Слабый снег
9	–0,7	2,1	231	6,2	0,4	10	9	10	Слабый снег
12	–0,6	1,0	251	3,6	0,3	9	9	9	Слабый снег
15	–1,1	0,9	200	3,5	0,4	9	10	10	Снег
18	–1,5	0,8	194	3,1	0,5	9	10	10	Снег
21	–1,8	0,7	199	0,0	0,5	9	10	10	Снег
17.01.09									
0	–2,1	0,8	68	0,0	0,6	8	10	10	Снег
3	–2,4	0,9	42	0,0	0,7	9	10	10	Снег
6	–2,5	1,4	36	5,8	0,8	9	10	10	Снег, метель
9	–2,2	1,7	52	6,7	0,7	9	10	10	Снег, метель
12	–1,9	2,7	42	6,5	0,6	9	10	10	Снег, метель
15	–2,2	2,5	52	7,9	1,7	9	10	10	Сильный снег, метель
18	–2,6	3,3	49	8,6	1,6	8	10	10	Сильный снег, метель
21	–3,2	2,9	52	6,4	0,5	7	10	10	Снег, метель
24	–3,7	2,6	44	7,2	0,4	7	10	10	Снег, метель

Book_Gidromet.indb Sec1:143 13.01.2010 13:13:31

Прогноз погоды в г. Москве

Время	Темпер.	Ветер			Осадки	Облачность			Погодные явления
МСВ ч	°С	Скор. м/с	Напр. град	Пор. м/с	мм/3 ч	Ниж.	Сред.	Общ.	
						баллы			
08.07.08									
0	15,4	2,7	199	8,6	0,00	1	5	6	
3	15,8	2,5	204	8,4	0,02	2	7	8	
6	18,7	3,9	194	7,2	0,14	2	7	8	Слабый дождь
9	20,6	4,4	182	7,9	0,27	2	9	9	Слабый дождь
12	21,7	4,3	186	7,5	0,34	2	10	10	Гроза
15	21,6	4,7	181	8,0	0,89	4	10	10	Гроза, дождь
18	20,1	4,9	171	8,6	2,01	5	10	10	Ливень
21	19,0	4,4	169	7,8	0,93	5	10	10	Дождь
09.07.08									
24	18,3	4,4	162	8,0	0,77	5	10	10	Дождь
3	19,2	4,7	159	8,6	1,29	6	10	10	Дождь
6	21,3	4,7	156	8,2	2,20	6	10	10	Ливень
9	22,8	4,6	152	7,8	2,07	7	10	10	Ливень
12	23,8	4,8	153	8,1	2,94	8	10	10	Гроза, ливень
15	23,9	4,4	143	7,1	3,54	8	10	10	Гроза, ливень
18	22,8	4,2	147	6,7	3,86	9	10	10	Гроза, ливень
21	21,9	3,9	144	6,1	3,16	9	10	10	Гроза, ливень
24	21,2	3,9	151	6,2	1,80	9	10	10	Гроза, ливень

Book_Gidromet.indb Sec1:144 13.01.2010 13:13:32

Прогноз погоды в г. Москве

Время	Темпер.	Ветер			Осадки	Облачность			Погодные явления
ВСВ ч	°С	Скор. м/с	Напр. град	Пор. м/с	мм/3 ч	Ниж.	Сред.	Общ.	
						баллы			
24.11.08									
3	–4,1	2,1	149	6	0,0	7	8	9	
6	–3,1	2,7	165	7	0,1	7	8	9	Гололедица
9	–1,4	3,0	163	7	å0,3	8	10	10	Гололедица
12	–0,1	3,1	172	7	0,9	7	10	10	Гололедица
15	0,8	2,7	169	6	1,1	7	10	10	Гололедица
18	1,2	3,3	190	7	1,2	6	10	10	Гололедица
21	1,6	3,2	193	7	0,2	5	10	10	Гололедица
24	2,0	2,4	187	6	0,4	4	10	10	Гололедица
25.11.08									
3	2,2	2,5	208	6	0,5	4	10	10	Гололедица
6	2,4	2,2	209	6	1,1	4	10	10	Гололедица
9	2,9	2,1	211	6	0,2	4	10	10	
12	3,3	2,4	229	6	0,1	3	10	10	
15	3,7	2,2	229	6	0,1	3	10	10	
18	3,3	1,9	232	5	0,0	3	9	9	
21	2,8	1,8	231	5	0,0	3	9	9	
24	2,5	1,2	222	4	0,0	3	10	10	

ЛИТЕРАТУРА

1. *Багров А.Н.* Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // Информационный сборник № 35. Москва, 2008. С. 3—20.
2. *Беркович Л.В., Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А.* Гидродинамическая модель атмосферного и океанического пограничных слоев // Метеорология и гидрология, 1997, 7. С. 40—52.

Book_Gidromet.indb Sec1:145 13.01.2010 13:13:32

3. *Беркович Л.В., Тарнопольский А.Г., Шнайдман В.А.* Опыт восстановления внутренней структуры атмосферного пограничного слоя по оперативной метеорологической информации // Метеорология и гидрология, 1998, 7. С. 31—42.
4. *Беркович Л.В.,, Белоусов С.Л., Ткачева Ю.В.,* 1998: Краткосрочный гидродинамический прогноз метеорологических величин в пунктах на территории России и прилегающих стран // Метеорология и гидрология, № 4. С. 18—32.
5. *Беркович Л.В., и др.* Оперативный гидродинамический краткосрочный прогноз метеовеличин и характеристик погоды в пунктах // Метеорология и гидрология, 2001, № 2. С. 14—26.
6. *Булдовский Г.С.* Гидродинамический прогноз ветра по Москве и результаты его испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидродинамических прогнозов. Информационный сборник № 26. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. С. 8—17.
7. *Горлач И.А. и др.* Сравнительный анализ оправдываемости прогнозов осадков и температуры воздуха, получаемых на основе рекомендованных к внедрению методов и составляемых прогнозистами-синоптиками по центральный части Европейской территории России, Москве и Московской области // Информационный сборник № 35, Москва, 2008. С. 21—44.
8. *Веселова Г.К., Беркович Л.В.* О результатах испытания гидродинамического прогноза облачности по Москве на срок до 42 ч // Информационный сборник № 35, Москва, 2008. С. 18—22.
9. *Веселова Г.К., Беркович Л.В., Шакотько Е.Н.* О результатах оперативных испытаний гидродинамического краткосрочного прогноза погоды по Москве на основе полусферной неадиабатической модели атмосферы. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов // Информационный сборник № 25. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. С. 21—33.
10. *Пекелис Е.М. и др.* Численные гидродинамические модели мезомасштабного прогноза Гидрометцентра России. 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометиздат, 1999. С. 80—99.
11. *Berkovich L.V., at al.* Developments in the short-term dynamical weather forecasting system at the Hydrometeorological Research Center of Russia. Res. Act. in Atm. and Oceanic Modeling, 1999, No. 28, 5.7—5.8.
12. *Berkovich L.V., at al.* Short-range hydrodynamic forecasting of local weather patterns. – Res. Act. in Atm. and Oceanic Modeling, 2000, No. 30, 5.1—5.2.
13. *Berkovich L.V., Belousov S.L.* Hydrodynamical short-range weather forecasting for particular regions in the city of Moscow. WMO/TD No. 792, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modeling, No. 28, 1997, 5.3.—5.4.
14. *Berkovich L.V., Tkacheva Ju.V.* The hydrodynamic short-range of local weather forecasting . Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, 2003, No 33, 5.1—5.2.
15. *Berkovich L.V., Shnaydman V.A. Tkacheva Ju.V.* Operational forecast of the meteorological and turbulence characteristics of the boundary layer. Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, 2004, No 34, 5.17—5.18.
16. *Berkovich L.V., V.A. Tkacheva Ju.V.* Forecast of strong precipitation for locations of the European territory of Russia. Research Activity in Atmospheric and Oceanic Modeling, 2005, No 35, 5.3—5.4.
17. *Berkovich L.V. at al.* Adaptation of the PSU\NCAR MM5 for high-resolution weather prediction over Russia. Researc Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, 2005, No 35. P. 202—205.

Book_Gidromet.indb Sec1:146 13.01.2010 13:13:33

Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России

А.А. Алексеева, В.М. Лосев, Б.Е. Песков,
Е.В. Васильев, А.Е. Никифорова
Гидрометцентр России

Опасные явления погоды, и в частности, сильные шквалы, ливни и град, связанные с зонами активной конвекции (ЗАК), относясь к мезометеорологическим явлениям погоды, образуются в результате сложного взаимодействия макро-, мезо- и микромасштабных атмосферных процессов. Площадь, охваченная этими явлениями, во много раз меньше расстояния между пунктами метеорологических и аэрологических наблюдений. Все это и обусловливает трудность их исследования и предсказания, в т.ч. непосредственно в рамках численных моделей. Достижения в развитии отечественных гидродинамических моделей, качество прогнозирования которых хотя все еще и уступает лучшим зарубежным моделям, позволяют со сравнимой точностью использовать их выходные данные для прогноза опасных конвективных явлений.

Большинство методов прогноза конвективных явлений в рамках исследований данного направления [1] разработано по принципу «идеального прогноза», т.е. для их разработки использованы фактические метеорологические параметры атмосферы. В последнее время разработан метод альтернативного прогноза шквалов подходом MOS на выходных данных региональной модели.

К настоящему времени в оперативную практику Гидрометцентра России решением ЦМКП Росгидромета в 2006 г. внедрены методы альтернативного прогноза ливней и шквалов в градации ОЯ и метод прогноза максимального количества осадков. Методы альтернативного прогноза ливней и шквалов в 3-х градациях, включая градации ОЯ, проходят оперативные испытания в рамках плана Росгидромета.

Выходные данные региональной модели Гидрометцентра России удовлетворяют почти всем требованиям к данным для физико-синоптического прогноза конвективных явлений, за исключением того, что модель не генерирует в оперативном режиме в базу данных (БД) данные о влажности у поверхности земли. Прогноз этого

Book_Gidromet.indb Sec1:147 13.01.2010 13:13:33

поля находится в стадии разработки и авторских испытаний. И, конечно, желательно бы иметь данные о влажности до больших высот, а также весь комплект используемых данных с более детальным вертикальным разрешением. Частично эти проблемы приходится решать в рамках методов прогноза конвективных явлений путем использования блока физико-статистического прогноза приземной влажности.

Основой метода прогноза максимального количества осадков является определение количества выпавших осадков по влагосодержанию облака с учетом того известного факта, что большая часть сконденсированной в облаке влаги остается в атмосфере и не участвует в осадкообразовании. Такой учет осуществляется с помощью коэффициента генерации осадков (k_0) — отношения фактически выпавших осадков к общему количеству генерируемой облаком влаги.

В основе прогноза максимального количества смешанных осадков (обложных и ливневых) лежит формула вида [3]:

$$Q\,max_1 = b\,k_0\,Wm \qquad (мм/12\ ч) \qquad (1)$$

где b = 4,36 мм · с/м;
Wm — максимальная конвективная скорость, м/с;
k_0 — коэффициент генерации осадков, выраженный через упорядоченные вертикальные движения на уровне 850 гПа.

Количество осадков в случаях, когда дождь ливневого характера вносит основной вклад в общую сумму осадков, рассчитывается как функция только максимальной конвективной скорости:

$$Q\,max_1 = c\,Wm \qquad (мм/12\ ч). \qquad (2)$$

Причем, коэффициент регрессионной зависимости *c* определяется значениями влажности в слое 850—700 гПа и вертикальных упорядоченных движений на уровне 850 гПа.

Ранее проведенные исследования [3] показали, что при сильных ливнях, чем больше величина максимальной конвективной скорости, тем меньше разница между максимальной и средней интенсивностью осадков, продолжительностью ливневой части дождя и общей продолжительностью дождя. В связи с этим в формулу прогноза максимального количества осадков со средней интенсивностью конвективных осадков введен коэффициент на интенсивность конвекции L = f (Wm).

Book_Gidromet.indb Sec1:148 13.01.2010 13:13:34

Для смешанных и ливневых осадков при средней интенсивности конвективных осадков уравнения регрессии имеют вид:

$$Q\,max_2 = L\,b\,k_0\,Wm \qquad (мм/12\ ч) \qquad (3)$$

$$Q\,max_2 = L\,c\,Wm \qquad (мм/12\ ч) \qquad (4)$$

Согласно А.А. Акулиничевой [2] отношение продолжительности ливневой части дождя к общей продолжительности дождя характеризуется плотностью конвективных струй χ, средние значения которой для летних месяцев находятся в интервале 0,29—0,38.

Окончательная формула прогноза максимального количества осадков имеет вид:

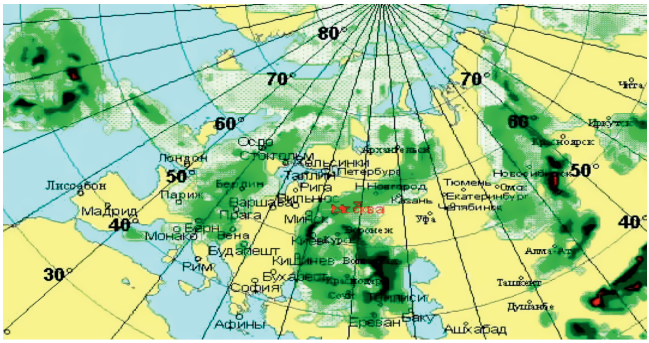
$$Q\,max = Q\,max_1 \cdot \chi + Q\,max_2 \cdot (1—\chi) \qquad (мм/12\ ч) \qquad (5)$$

Пример прогноза максимального количества осадков по данному методу представлен на рис. 1.

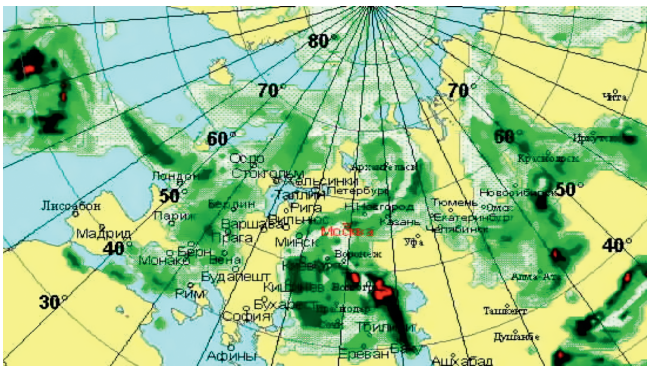
Как показала практика применения данного метода в разных регионах европейской территории России, метод завышает число прогнозируемых случаев с осадками и количество осадков. Это объясняется, во-первых, тем, что в прогностических модельных сглаженных полях, на основе которых строится стратификация температуры, тонкие задерживающие слои проявляются не всегда. В то время как, в таких случаях тонкие задерживающие слои вблизи уровня конденсации (~850 гПа) могут прерывать подъем термика и облачного элемента до возникновения в них осадков, несмотря на большую потенциальную неустойчивость атмосферы в более высоких слоях, не реализованную в такой ситуации. В рамках усовершенствования данного метода этот недостаток исправляется учетом лапласиана приземного давления L, характеризующего антициклоничность (L<0) и циклоничность (L>0) поля давления.

Во-вторых, при формировании скоплений и гряд мощных кучево-дождевых (Cb) облаков размером ~100 км, многочисленных восходящих конвективных потоков и масс облачных элементов в них, существующих несколько часов, большую роль должен играть значительный приток влажного воздуха у поверхности земли. Это объясняет указанную выше роль циклоничности (из уравнения неразрывности). При отсутствии достаточно длительного обеспечения Cb влажным воздухом устремляющийся вверх облачный элемент (струя, поток, ячейка, скопление облаков) будет небольшим и кратковременным, с малым количеством осадков, особенно в условиях

Book_Gidromet.indb Sec1:149 13.01.2010 13:13:34

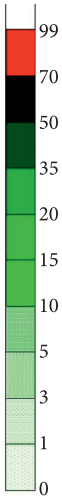


а) 12 ч ВСВ. Заблаговременность 24 ч.



б) 12 ч ВСВ. Заблаговременность 12 ч.

мм/12 ч



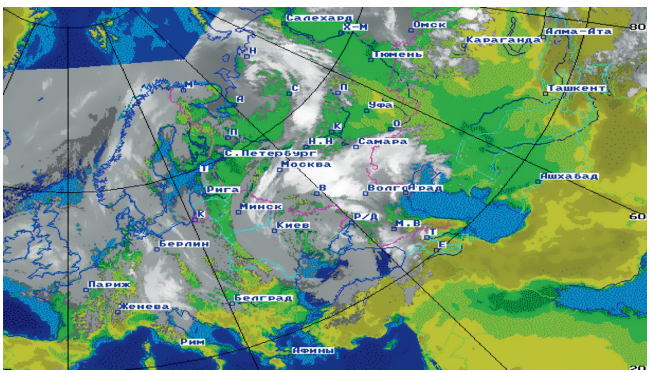


Рис. 1. Прогностические карты максимального количества осадков на 06.06.2001 г., рассчитанные на основе данных региональной численной модели, и снимок облачности с ИСЗ.

сухого окружающего воздуха. Поскольку приземная влажность прогнозируется в методе не в достаточной степени точно, этот фактор учитывается через дефицит влажности в нижней части тропосферы D_8, являющийся также показателем тонких задерживающих слоев.

На количество осадков оказывает также влияние скорость переноса кучево-дождевого облака $\vec{v}$, которая связана со скоростью ветра в тропосфере. Слишком быстрое прохождение Cb над станцией наблюдения уменьшает количество выпадающих осадков. С другой стороны, малоподвижность облака при слабом ветре снижает интенсивность дождя из-за уменьшения радиационного прогрева у поверхности земли.

Усовершенствованное уравнение для прогноза максимального количества осадков с учетом вышеперечисленных факторов имеет вид [5]:

$$Q_{np} = a''Q\max(bL_0 - |L - L_0|)(b'|\vec{v}|_0 - ||\vec{v}| - |\vec{v}|_0|)(b''D_0 - |D_8 - D_0|) + c'', \qquad (6)$$

где b, b', a'', b'', c'' — коэффициенты регрессионной зависимости, L_0, $\vec{v}_0$, D_0 — оптимальные значения лапласиана приземного давления, скорости переноса и дефицита точки росы на уровне 850 гПа.

Предложенные уточнения делают метод прогноза летних дождей физически еще более обоснованным и практически значимым. При этом повышаются все или большинство важнейших характеристик качества прогнозирования.

Прогноз ливней в градации ОЯ осуществляется по дискриминантной функции, позволяющей по набору признаков с помощью выбранного решающего правила определить, к какому классу относится рассматриваемый объект: к классу «ливни в градации ОЯ» или к классу «без ливней в градации ОЯ». Для оценки качества разделения классов использовались такие характеристики, как: 1) выборочное расстояние Махаланобиса; 2) предупрежденность и оправдываемость каждого из классов.

Отбор предикторов, определяющих выпадение ливней в градации ОЯ, производился на основе физической сущности происходящего процесса, т.е. исходя из условий и механизма образования ливней в градации ОЯ. Т.к. главной причиной образования ливней в градации ОЯ является вертикальная неустойчивость атмосферы, мерой интенсивности поднятия восходящего воздуха за счет конвекции выбрана величина максимальной конвективной скорости (Wm). Одним из основных факторов, влияющим на количество осадков, является

Book_Gidromet.indb Sec1:151 13.01.2010 13:13:36

влажность у поверхности Земли и степень увлажнения восходящего воздуха. Точка росы у поверхности Земли (Td) характеризует массовую долю влаги у поверхности Земли и влияет на высоту уровня конденсации. Степень увлажнения восходящего воздуха оценивается средним дефицитом влажности в слое 850—700 гПа (d_{8-7}). Лапласиан приземного давления (ΔP) характеризует конвергенцию воздушных масс в нижнем слое тропосферы, благоприятствующую развитию суперячейковых кучево-дождевых облаков. Он косвенно определяет знак и модуль упорядоченных вертикальных движений на уровне 850 гПа, которые вносят вклад в интенсивность и количество ливней в градации ОЯ. Наибольшая информативность этих параметров подтверждена их ранжированием с помощью коэффициента точечно-биссериальной корреляции, который наиболее удобен для выявления связи между предикторами и двумя классами явлений, исключающими друг друга.

Таким образом, дискриминантная функция (L) является функцией (F) от следующих 4-х параметров атмосферы:

$$L = F (Wm, Td, \Delta P, d_{8-7}). \quad (7)$$

Прогноз шквалов в градации ОЯ осуществляется по дискриминантной функции, полученной подходом, аналогичным прогнозу ливней в градации ОЯ.

Наиболее информативным предиктором при прогнозе шквалов в градации ОЯ является максимальная конвективная скорость (Wm). Очевидна физичность данного предиктора. Только при наличии мощной восходящей струи (среднее значение Wm=28,2 м/с) может накопиться достаточно влаги, которая затем, обрушиваясь вниз, создает мощный нисходящий поток и шквал.

Другим наиболее информативным предиктором является лапласиан приземного давления (гПа/(300 км)^2), отражающий циклоничность у земли и, как следствие, конвергенцию горизонтальных приземных потоков воздуха, необходимых для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками. Одной только вертикальной неустойчивости недостаточно для создания мощных запасов влаги в кучево-дождевом облаке, необходима «подпитка» для восходящих движений за счет конвергенции горизонтальных потоков. Этот параметр важен и потому, что позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Большое количество случаев со шквалами наблюдается при лапласиане 0—4 (гПа/(300 км)^2). Это вполне объяснимо, поскольку при лапласиане >> 5 чаще всего образуется много слоистой облачности, что приводит к уменьшению прогрева

Book_Gidromet.indb Sec1:152 13.01.2010 13:13:37

воздуха у земли, и, как следствие этого, уменьшению энергии неустойчивости и снижению конвективных скоростей. При лапласиане << –10 шквалы не развиваются и с большой вероятностью можно прогнозировать их отсутствие. Появление шквалов при небольших отрицательных значениях лапласиана приземного давления объясняется тем, что при небольшой антициклоничности иногда образуются локальные ложбины, которые можно заметить на приземных картах при проведении изобар через 1 гПа. Наиболее благоприятная синоптическая ситуация создается при значениях лапласиана приземного давления в диапазоне 1—3 (гПа/(300 км)^2), когда образующиеся линии шквалов или неустойчивости создают конвергенцию потоков при безоблачной в первой половине дня погоде. Случаи без шквалов при небольшом положительном лапласиане от 2 до 4 обязаны так называемым «сухим фронтам» с сухим и слабо неустойчивым воздухом. Эти случаи хорошо отражаются таким предиктором, как максимальная конвективная скорость (Wm). Поэтому использование сочетания этих предикторов (Wm и лапласиана приземного давления) для прогноза шквалов в градации ОЯ в большей степени уменьшает недостатки использования их по отдельности.

Таким образом, дискриминантная функция (L1) для прогноза шквалов в градации ОЯ является функцией (F) от таких параметров, как:

$$L1 = F\,(Wm, \Delta P). \qquad (8)$$

Для прогноза максимальной скорости ветра при шквале разработано прогностическое уравнение:

$$V_{ø} = a \cdot W_m^{\frac{1}{n}} [(\left|\vec{V}\right|_7^5 + b)(\nabla^2 p_{300} + c)]^{\frac{1}{m}} + d \cdot (\left|\vec{V}\right|_7^5 + g)^{\frac{1}{k}} + f \cdot \left|\vec{V}\right|_7^5 - CC, \qquad (9)$$

где Wm — максимальная конвективная скорость, м/с;

$\left|\vec{V}\right|_7^5$ — модуль средней векторной скорости ветра в слое 700—500 гПа, м/с;

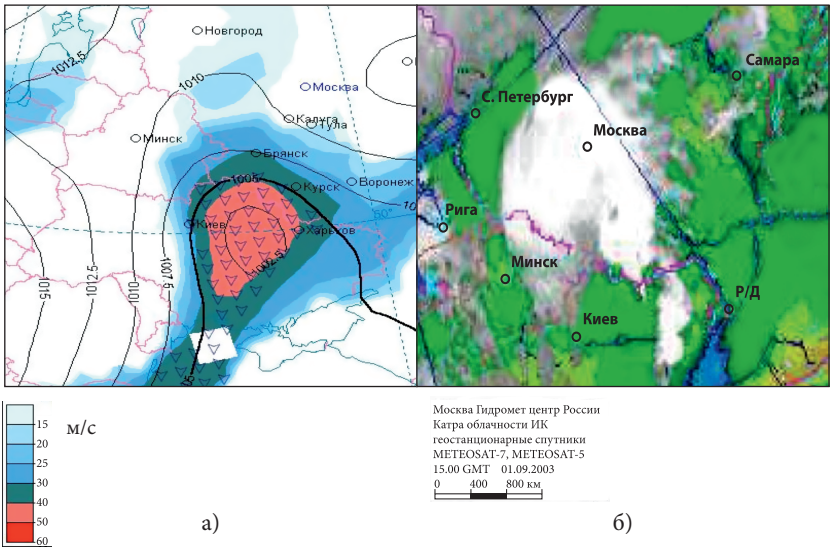
$\nabla^2 p_{300}$ — лапласиан приземного давления, гПа/300 км^2;

a, b, c, d, g, f, CC — эмпирические коэффициенты.

Эмпирические коэффициенты и степенные показатели входящих в уравнение предикторов меняются в зависимости от периода сезона возможного возникновения шквалов.

Пример прогноза шквалов в градации ОЯ и максимальной скорости ветра при шквале представлен на рис. 2.

Book_Gidromet.indb Sec1:153 13.01.2010 13:13:37



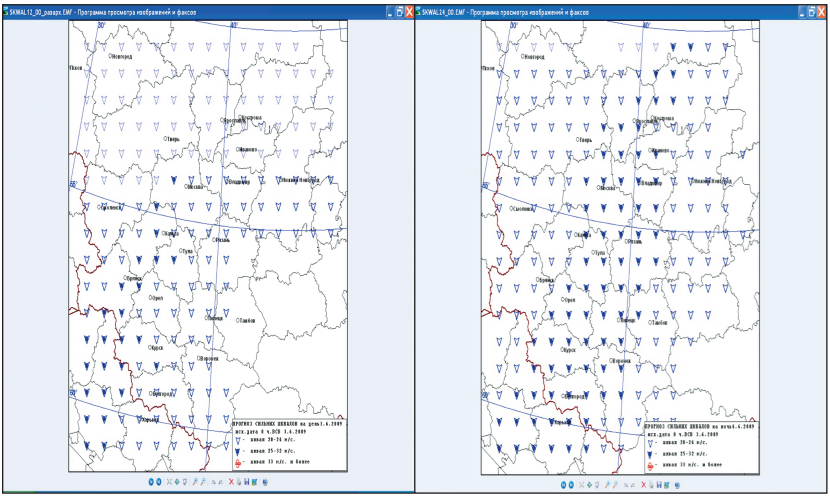
а) б)

Рис. 2. Прогноз шквалов в градации ОЯ (значки шквала), скорости ветра (м/с) при шквалах (закрашенные области) и барического поля на уровне 1000 гПа (изолинии) на срок 12 (а) ВСВ 01.09.2003 г. по исходному сроку 12 ВСВ 31.08.2003 г. (заблаговременность 24 ч) и карта облачности ИК геостационарных спутников METEOSAT-7 и METEOSAT-5 срок 15 (б) ВСВ 01.09.2003 г.

На основе вышеописанных методов разработаны 2 комплексных метода альтернативного прогноза шквалов и ливней в 3-х градациях, которые в настоящее время испытываются в Центральном федеральном округе (ЦФО). Пример прогноза приведен на рис. 3.

Кроме того, новой разработкой данного направления является комплексный метод альтернативного прогноза шквалов, базирующийся на десяти вариантах прогноза шквалов, каждый из которых представляет собой прогноз шквалов по дискриминантным функциям выделенных кластеров в оптимальном диапазоне значений информативных для возникновения шквалов предикторов (максимальной конвективной скорости, лапласиана приземного давления с шагом расчета 150 км; упрощенной оценки максимальной конвективной скорости через линейную комбинацию предикторов, характеризующую отклонение кривой состояния от кривой стратификации на поверхности 700 гПа по методу частицы, поднимающейся от Земли; разности температур воздуха на поверхностях 850 и 700 гПа; предиктора, рассчитанного по скорости ветра на уровне 700 гПа,

Book_Gidromet.indb Sec1:154 13.01.2010 13:13:38



а) б)

Рис. 3. Прогноз сильных шквалов на день 03.06.2009 г. с заблаговременностью 12 ч (а). Прогноз сильных шквалов на ночь 04.06.2009 г. с заблаговременностью 24 ч (б).

температуры воздуха и температуры точки росы у земли; полной скорости ветра у Земли при шквале) [4].

Комплексный метод прогнозирует:

– ситуации «без шквалов» (цифра 0 на карте);

– «шквал» (со скоростью 15—21 м/с, цифра 3 на карте);

– «вероятен сильный шквал» (со скоростью 22—24 м/с, цифра 5 на карте);

– «сильный шквал» (со скоростью 22—24 м/с, цифра 6 на карте);

– «вероятен очень сильный шквал» (со скоростью 25—32 м/с, цифра 7 на карте);

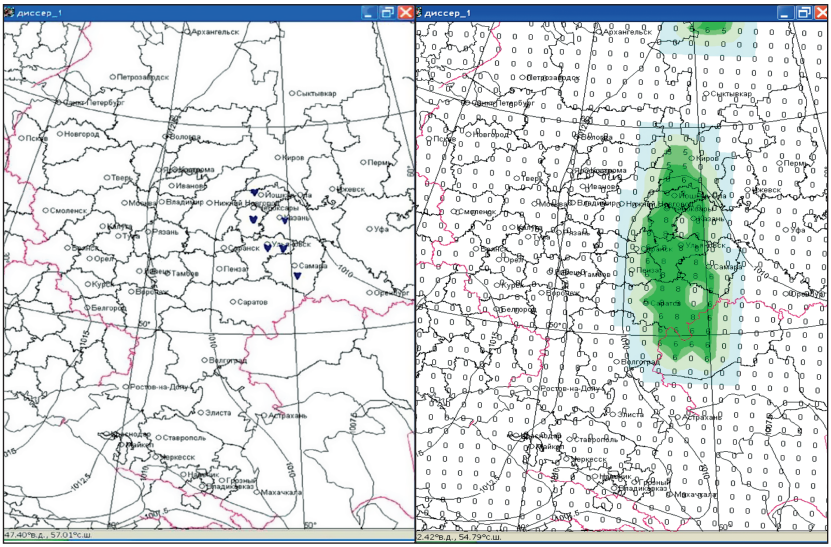
– «очень сильный шквал» (со скоростью 25—32 м/с, цифра 8 на карте);

– «очень сильный и локально ураганный шквал» (со скоростью ≥33 м/с, число 10 на карте).

Правила формирования прогноза комплексным методом выработаны на основе анализа положительных для практики прогнозирования сторон каждого варианта прогнозов.

Пример прогноза по этому методу приведен на рис. 4.

Book_Gidromet.indb Sec1:155 13.01.2010 13:13:40



а) б)

Рис. 4. Карта фактически наблюдаемых сильных шквалов (а) и карта прогноза шквалов на 12.00 ВСВ 01.07. 2007 г. по комплексному методу (б).

Прогноз града в 2-х градациях (ОЯ и НЯ) осуществляется на основе комплексирования альтернативного прогноза града в градации ОЯ и прогноза размера градин.

Прогноз опасной совокупности конвективных явлений разработан на основе выше указанных методов с учетом требований практики, т.к. известно, что совокупность по отдельности неопасных конвективных явлений может приводить к ущербу в тех случаях, когда интенсивность каждого явления совокупности достигает примерно 75% от критерия ОЯ. Методом может прогнозироваться как отдельное конвективное явление (ливень, град, шквал) в градации ОЯ или НЯ, так и их комплексы. На прогностической карте явлению или комплексу соответствует определенная присвоенная цифра.

Пример прогноза этим методом представлен на рис. 5, типизация явлений — в таблице 1.

В последнее время в Гидрометцентре России разработан программный комплекс прогноза опасных конвективных явлений (ливней, шквалов, града, комплексов конвективных явлений с детализацией типа и интенсивности) с заблаговременностью не менее 24 часов

Book_Gidromet.indb Sec1:156 13.01.2010 13:13:41

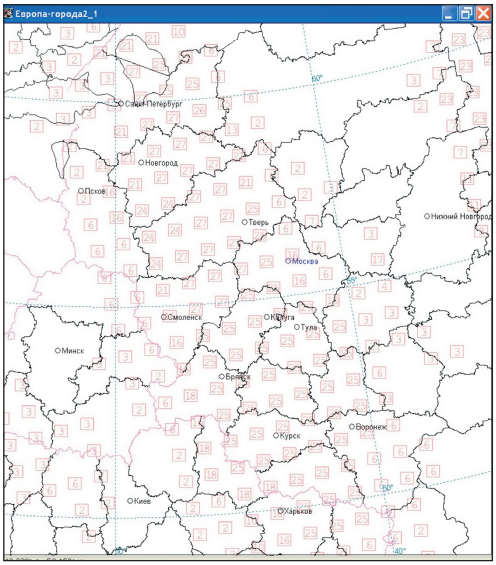


Рис. 5. Прогноз конвективных комплексов НЯ и ОЯ на 13 июля 2007 г. (дневное время) с заблаговременностью 12 ч.

на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России. Особенностью комплекса является единая реализация технологий регионального прогнозирования и прогноза опасных и неблагоприятных конвективных явлений погоды, ежечасная дискретность расчета прогнозов конвективных НЯ и ОЯ, расчет прогностических карт явлений за период 12 ч, более широкий диапазон прогнозируемых конвективных явлений. На сегодняшний день это прогнозы:

– ливней в 3-х градациях: сильные (от 11 до 35 мм/12 ч), НЯ (от 35 до 50 мм/12 ч) и ОЯ (50 и более мм/12 ч);

– шквалов в градациях: НЯ (от 20 до 24 м/с), ОЯ (от 25 до 33 м/с), ураганной силы ветра 33 м/с и более);

– града в градациях: НЯ (диаметр менее 2 см) и ОЯ (диаметр 2 см и более);

– конвективных комплексов НЯ и ОЯ с детализацией типа явления (все конвективные явления данных градаций);

– максимального количества осадков;

– максимальной скорости ветра при шквале;

– прогноз шквалов любой градации комплексным методом.

Book_Gidromet.indb Sec1:157 13.01.2010 13:13:42

Таблица 1

Типизация явлений		Цифры «кода»
Тип явления	**Детализация типов**	
Одно явление в градации НЯ	Град	1
	Шквал	2
	Ливень	3
Комплексы двух явлений в градации НЯ	Ливень и град	4
	Шквал и град	5
	Ливень и шквал	6
Комплекс трех явлений в градации НЯ	Ливень, град и шквал	7
Одно явление в градации ОЯ	Град	8
	Шквал	10
	Ливень	11
Комплексы двух явлений в градациях ОЯ и НЯ	Шквал ОЯ и град НЯ	12
	Ливень ОЯ и шквал НЯ	13
	Ливень ОЯ и град НЯ	14
	Шквал НЯ и град ОЯ	15
	Ливень НЯ и шквал ОЯ	16
	Ливень НЯ и шквал ОЯ	17
Комплексы двух явлений в градациях ОЯ	Ливень и шквал	18
	Шквал и град	19
	Ливень и град	20
Комплексы трех явлений: двух в градации НЯ и одного в градации ОЯ	Ливень и град в градации НЯ, шквал в градации ОЯ	21
	Ливень и шквал в градации НЯ, град в градации ОЯ	22
	Град и шквал в градации НЯ, ливень в градации ОЯ	23
Комплексы трех явлений: двух в градации ОЯ и одного в градации НЯ	Град и шквал в градации ОЯ, ливень в градации НЯ	24
	Ливень и шквал в градации ОЯ, град в градации НЯ	25
	Ливень и град в градации ОЯ, шквал в градации НЯ	26
Комплексы трех явлений в градации ОЯ	Ливень, град и шквал в градации ОЯ	27

Book_Gidromet.indb Sec1:158 13.01.2010 13:13:43

Программный комплекс находится в режиме совершенствования, как за счет развития методов прогнозирования опасных конвективных явлений, так и за счет усовершенствования региональной модели (параметризации физических процессов, увеличения пространственного разрешения модели). Таким образом, в последнее десятилетие разработан целый комплекс методов прогноза опасных явлений, охватывающий все явления конвективного характера. Методы постоянно совершенствуются и базируются на региональной модели с ежечасной дискретностью прогноза. Уточнять прогнозы с меньшей (несколько часов) заблаговременностью рекомендуется на основе использования радиолокационных и спутниковых данных, а также детального анализа текущих изменений синоптической ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеева А.А.* Летние конвективные явления // Монография «Гидрометеорологические опасности». Тематический том. / Под ред. Г.С. Голицына. А.А. Васильева. М.: Издательская фирма «КРУК», 2001. С. 127—159.
2. *Акулиничева А.А.* Параметры дождей над районами Поволжья // Труды Гидрометцентра СССР, 1969, вып. 57. С. 113—118.
3. *Глушкова Н.И.* Исследование физико-статистических условий образования осадков // Труды Гидрометцентра СССР, 1985, вып. 266. С. 10—20.
4. *Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология, 2009, № 1. С. 5—15.
5. *Песков Б.Е., Алексеева А.А., Никифорова А.Е.* Усовершенствование метода прогноза летних осадков // Метеорология и гидрология, 2008, № 10. С. 52—61.

Глобальная оперативная спектральная модель Гидрометцентра России: основные характеристики и особенности использования в технологиях кратко- и среднесрочного прогноза

И.А. Розинкина, Ю.В. Алферов, Е.Д. Астахова, Т.Я. Пономарева, В.И. Цветков
Гидрометцентр России

Вступление

Основной практической целью глобального гидродинамического прогноза погоды является получение расчетной информации о развитии атмосферных процессов над крупными территориями (полушарием) на несколько суток вперед для дальнейшей синоптической и статистической интерпретации. Помимо этого, с успешным развитием мезомасштабного моделирования, глобальный численный прогноз стал поставщиком граничных условий для моделей с более высокой пространственной детализацией по ограниченным территориям, вырабатывающих прогнозы на меньшие сроки. Глобальные модели являются прогностическими блоками глобальных систем усвоения данных метеорологических наблюдений, необходимыми для выработки полей первого приближения для этих систем. Прогностическая информация на нижней границе атмосферы является необходимой составляющей для получения информации для систем прогноза и анализа деятельного слоя океана. Таким образом, **функционирование и развитие глобальных численных моделей является залогом успешного функционирования всего технологического комплекса численного прогнозирования крупных прогностических центров.**

Следует отметить, что для таких территориально протяженных стран, как Россия, именно глобальный численный прогноз может быть основой методологии составления краткосрочных и среднесрочных прогнозов погоды для всей территории страны, прилегающих акваторий и воздушного пространства.

В Гидрометцентре России с конца 80-х годов оперативно функционирует спектральная модель атмосферы (до 1998 г. — полушарная) с изменяющимися конфигурациями пространственного разрешения

Book_Gidromet.indb Sec1:160 13.01.2010 13:13:44

(с 2008 г. — в версии T169L31). Прототипом данной прогностической системы послужила спектральная модель общей циркуляции атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП).

В настоящее время оперативная технология глобального прогноза, основанная на спектральной модели атмосферы, обеспечивает отечественной прогностической информацией все территориальные управления по гидрометеорологии Росгидромета, является ядром функционирующей в Гидрометцентре России Системы усвоения данных о состоянии атмосферы. Помимо этого, глобальная спектральная модель предоставляет граничные условия для региональной модели атмосферы. На базе данной глобальной модели в Гидрометцентре России создана система кратко- и среднесрочного ансамблевого прогноза, на одной из версий спектральной модели построена система долгосрочного (на месяц) ансамблевого прогнозирования Гидрометцентра России. Имеется целый ряд дополнительных приложений выходной продукции глобальной спектральной модели атмосферы.

В данной статье будут рассмотрены следующие вопросы:

1. Ознакомление с математической основой и с алгоритмами глобальной спектральной модели, функционирующей в Гидрометцентре России.

2. Ознакомление со структурой и основными компонентами программного комплекса «Спектральная модель».

3. Прогностические технологии, базирующиеся на глобальном моделировании Гидрометцентра России.

4. Текущие задачи развития глобальной прогностической технологии.

В статье использовались материалы отчетов и публикаций Лаборатории Глобальных Среднесрочных прогнозов погоды Гидрометцентра России.

1. Краткое изложение математической основы глобальной спектральной модели Гидрометцентра России

Для реализации модели атмосферной циркуляции требуется: формулирование математической модели задачи, разработка алгоритма ее решения и его программная реализация с учетом особенностей архитектуры используемой вычислительной системы.

Book_Gidromet.indb Sec1:161 13.01.2010 13:13:44

1.1. Основные положения математической модели

Полное описание уравнений глобальной спектральной модели атмосферы приводится в [8]. Остановимся лишь на основных положениях.

Базовая спектральная модель атмосферы основана на системе уравнений гидротермодинамики бароклинной атмосферы. Система состоит из уравнений движения, гидростатики, неразрывности, притока тепла, переноса влаги, диагностических соотношений для вертикальной составляющей скорости ветра. Для определения источников тепла и влаги, входящих в правые части уравнений (явно моделью не разрешаемых в силу своих пространственных масштабов), используется совокупность физических параметризаций подсеточных процессов: переноса радиации, конвекции, турбулентности, осадкообразования, процессов на подстилающей поверхности.

Для удобства спектрального представления уравнения движения для скорости преобразуются в уравнения для вихря и дивергенции.

Вертикальная область $0 \le \sigma \le 1$ разбивается на N слоев (в оперативной конфигурации 2009 г. N = 32), разделенных N-1 уровнями с фиксированными значениями σ на них (σ = отношение *P* к *Ps*, где *Ps* — атмосферное давление у земной поверхности, *P* — давление на σ-уровне).

Основные переменные модели (температура, горизонтальные составляющие скорости ветра, отношение смеси), определяются для слоев и, таким образом, вычисляемые значения приписываются к значениям промежуточных σ°, которые идентифицируются полуцелыми индексами σ. Использование сигма-координаты позволяет учесть влияние орографии в модели и обойти трудности, связанные с формулировкой нижнего граничного условия.

Таким образом, область, в которой ищутся решения уравнений модели общей циркуляции атмосферы, ограничивается подстилающей поверхностью (суши или океана) и верхней границей со значением верхнего счетного σ° — полуцелого индекса σ (1/2) (верхнего счетного уровня модели атмосферы). В существующей оперативной версии модели атмосферы $\sigma^\circ = 0{,}1$, что над акваториями соответствует приблизительно 10 гПа с учетом выполнения условия равенства нулю вертикальной скорости для σ = 0 и σ = 1.

Искомыми переменными, вычисляемыми на каждом временном шаге, служат горизонтальные компоненты вектора скорости движения, дивергенция, вихрь скорости ветра, температура воздуха, отношение смеси влажного воздуха, приземное давление, температура подстилающей поверхности, увлажненность верхнего слоя

Book_Gidromet.indb Sec1:162 13.01.2010 13:13:45





почвы, толщина снежного покрова. Помимо этого, на каждом временном шаге вычисляются суммы выпавших осадков (конвективных и крупномасштабных), компоненты теплового баланса подстилающей поверхности, компоненты радиационного баланса подстилающей поверхности, напряжение приземного трения, притоки радиационного тепла к слоям атмосферы.

Независимые переменные: время *t* и координаты (λ, φ, σ) в сферической системе отсчета.

Для решения приведенных выше уравнений используются следующие *граничные условия:*

- для вертикальной скорости ставится условие равенства нулю вертикальной скорости для σ = 0 и σ = 1;

- для прогностических переменных — температуры, влажности, составляющих скорости ветра — отсутствия потоков, обусловленных действием факторов «подсеточной физики», выше верхнего счетного уровня.

Нижняя граница области интегрирования определяется как поверхность океана над акваториями и как граница деятельного слоя почвы над участками суши. При этом для границы *атмосфера — океан* нет никаких ограничений по потокам, обусловленным составляющими радиационного баланса подстилающей поверхности и турбулентными движениями в приводном слое; в случае раздела *атмосфера — суша* решаются уравнения для температуры и влажности деятельного слоя. В результате для каждого шага по времени вычисляются новые значения температуры *Ts* и влажности *Ws* деятельного поверхностного слоя суши, модулирующие на следующем шаге по времени значения составляющих теплового и длинноволнового радиационного балансов. При этом величина потока из деятельного во внутренний слой почвы определяется заданием постоянных для данной ячейки значений его температуры и влагосодержания.

Для вертикальной скорости $\dot{\sigma}$ начальное условие не требуется, так как она находится из уравнения неразрывности, не содержащего производных по времени.

Помимо главного модуля, в технологии «Спектральная модель» присутствуют 2 обязательных модуля — пре- и постпроцессинг, основными задачами которых является подготовка стартового набора для модели атмосферы на расчетной сетке (препроцессинг) и, соответственно, информации для пользователей на регулярных широтно-долготных сетках и изобарической системе вертикальных координат, а также — вычисления ряда диагностических характеристик.

Book_Gidromet.indb Sec1:163

13.01.2010 13:13:45

1.2. Используемые алгоритмы

1.2.1. Описание метода решения уравнений модели атмосферы

Для интегрирования уравнений модели используется так называемый спектрально-сеточный подход. Он заключается в следующем.

Все основные переменные и геопотенциал земной поверхности представляется в виде усеченных рядов Фурье с использованием присоединенных полиномов Лежандра первого рода. Используется треугольное усечение по сферическим гармоникам (в версии T169L31 по 169). Для вычисления временных тенденций спектральных коэффициентов используется метод спектральных преобразований, заключающийся во введении сетки, покрывающей сферу, в одних и тех же узлах которой вычисляются значения всех искомых функций, а также — производные по горизонтальным координатам от температуры, влажности воздуха, вихря, дивергенции, логарифма приземного давления. По этим данным рассчитываются в узлах сетки подынтегральные нелинейные выражения, после чего находятся тенденции спектральных коэффициентов. Вычислительная сетка выбирается так, чтобы обеспечить в пределах ошибок усечения рядов точный вклад в тенденции спектральных коэффициентов от квадратично-нелинейных слагаемых.

Таким образом, при решении полученных уравнений часть вычислений проводится в спектральном пространстве (т.е. со спектральными коэффициентами), а часть, включая вычисление нелинейных динамических слагаемых основных прогностических уравнений и эффектов физических процессов подсеточного масштаба, — в сеточном пространстве (в узлах сетки). При переходе из спектрального пространства в сеточное выполняются некоторые расчеты в пространстве образов Фурье (с коэффициентами Фурье).

Модель параметрическим образом учитывает важнейшие процессы подсеточного масштаба: радиационно-облачное взаимодействие, процессы в пограничном слое атмосферы, проникающую конвекцию, крупномасштабную конденсацию, процессы на поверхности суши. Мелкомасштабные процессы горизонтальной турбулентности учтены с помощью диффузионной линейной схемы четвертого порядка.

По времени применяется полунеявная схема интегрирования. Структура временного шага модели условно изображена на рис. 1. На рисунке буквы *G* или *S* показывают, что на данном этапе вычисле-

Book_Gidromet.indb Sec1:164 13.01.2010 13:13:45



Рис. 1. Схема шага по времени алгоритма интегрирования уравнений модели атмосферы.

ния проводятся в сеточном или спектральном пространстве. Запись $G \rightarrow S$ (или $S \rightarrow G$) означает, что в этом месте осуществляется переход из сеточного пространства в спектральное (или наоборот). На каждом временном шаге производятся расчеты для трех моментов времени, что показано индексами *t-1, t, t+1*.

На каждом временном шаге выполняется два сканирования по широтам, реализованные в подпрограммах SCAN1 и SCAN2. Расчеты выполняются последовательно для всех кругов широты; при этом сначала рассматривается самая северная широта, затем самая южная, потом следующая северная и следующая южная и т.д. до экватора.

Программное обеспечение модели написано на Фортране. В целом, это 128 программ или около 20 000 строк.

Book_Gidromet.indb Sec1:165 13.01.2010 13:13:46

1.2.2. Описание функционирования модели:

А. Блок инициализации по нормальным модам

Блок инициализации выполняет начальное согласование полей ветра и геопотенциала путем фильтрации ложных гравитационных мод, возникающих из-за несогласованности различных видов информации в стартовых полях. Используется алгоритм нелинейной инициализации по нормальным модам. Применяется релаксационная итерационная схема. В течение каждой итерации производится аналог шага по времени модели атмосферы (в текущей версии — только динамического блока, возможно включение полной версии модели атмосферы). Количество итераций определяется в файле внешних настроек. В работающей в настоящее время версии оперативной технологии используется 5 итераций. Блок использует внешние файлы, содержащие собственные вектора нормальных мод модели атмосферы, значения которых рассчитаны для конкретной конфигурации модели атмосферы.

Модель может работать как с включением, так и без включения данного блока. Необходимость включения блока инициализации определяется соответствующим параметром в файле внешней настройки INILST, где также задаются некоторые параметры схемы инициализации.

Б. Блок вычислений в сеточном пространстве

После окончания работы блока инициализации начинается непосредственное интегрирование модели атмосферы по времени. При выполнении шага по времени, сначала проводятся вычисления эффектов физических процессов подсеточного масштаба на гауссовой сетке. Расчеты выполняются последовательно для всех кругов широты; при этом сначала рассматривается самая северная широта, затем самая южная, потом следующая северная и следующая южная и т.д. до экватора. После этого в том же цикле по широтам проводятся вычисления нелинейных динамических слагаемых и рассчитываются спектральные коэффициенты для основных переменных модели и некоторых дополнительных характеристик (описание блока перехода из сеточного в спектральное пространство см. ниже).

В. Блок совокупности параметризаций «подсеточных» процессов

Так называемый блок «физики» вызывается на каждом временном шаге. Вызов осуществляется в циклах по широтам, для каждой

Book_Gidromet.indb Sec1:166 13.01.2010 13:13:46

Book_Gidromet.indb Sec1:167

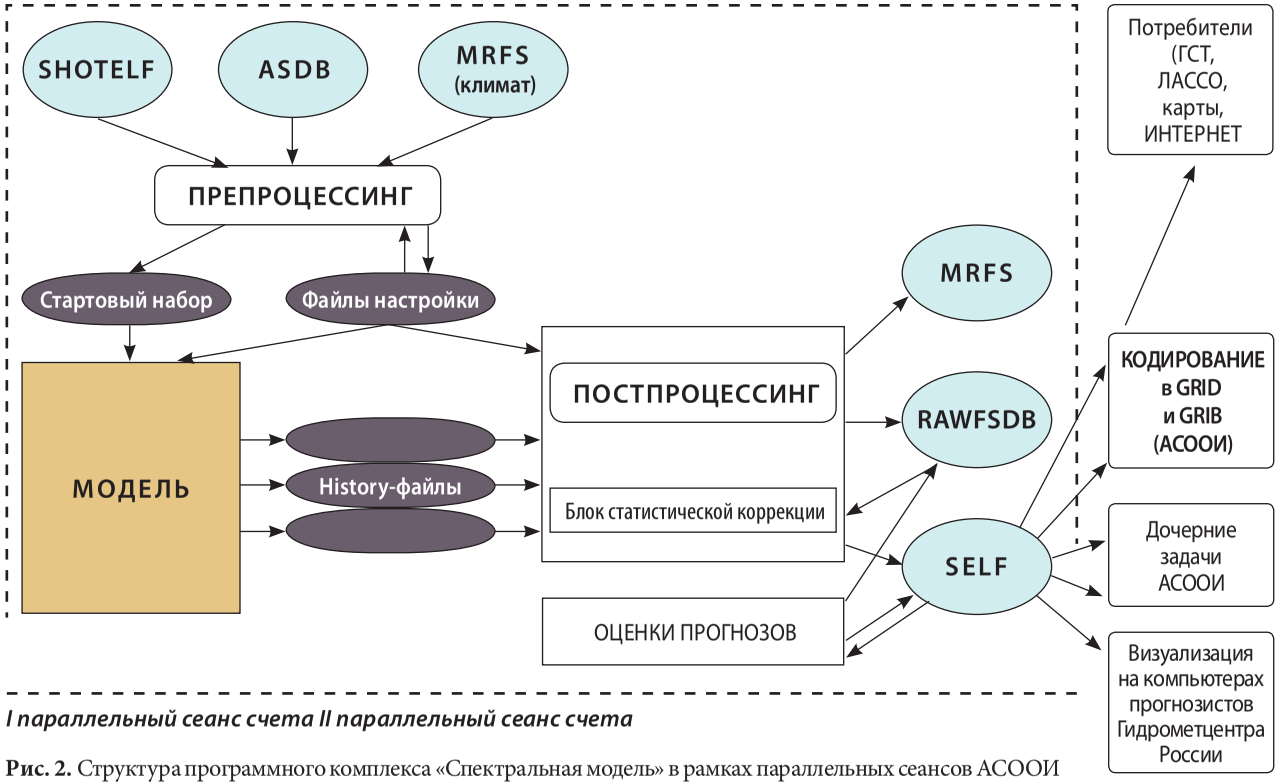


Рис. 2. Структура программного комплекса «Спектральная модель» в рамках параллельных сеансов АСООИ (крупными овалами показаны базы данных, более мелкими — наборы данных, прямоугольниками — исполняемые модули, см. текст).

13.01.2010 13:13:46

широты модели атмосферы. Внутри каждой программы выполняются вычисления для всех точек на круге широты в вертикальных столбах атмосферы независимо для каждого столба. Блок «физики» состоит из нескольких последовательных «подблоков», вызываемых также на каждом временном шаге (кроме радиационного блока, частота вызова которого определяется в файле настроек SDSLST). Каждый из подблоков вычисляет тенденции значений температуры, горизонтальных компонент скорости ветра, влажности воздуха. Таким образом, после работы очередного подблока значения переменных подправляются за счет действия факторов, описываемых данным блоком. Достаточно подробное изложение алгоритмов приводится в [8]. Остановимся лишь на кратком описании основных положений.

B1. Радиационный подблок

Радиационный подблок объединяет расчеты переноса длинноволнового и коротковолнового излучения в толще атмосферы при наличии облачности. Выполнение полного цикла радиационных вычислений требует значительных затрат машинного времени, поэтому, как правило, в оперативных технологиях используют алгоритмы, позволяющие «прореживать» во времени ряд вычислений. Так, в настоящей версии расчеты радиационно-облачного взаимодействия могут выполняться в режиме «без суточного хода радиации», когда во всех точках широтного круга используется зонально-осредненный зенитный угол Солнца и радиационный блок включается, например, раз в сутки, и в режиме «с приближенным учетом суточного хода», когда полные радиационные вычисления проводятся несколько раз в сутки, а на каждом шаге потоки коротковолновой радиации и радиационные притоки тепла пересчитываются по упрощенным формулам с учетом текущего значения зенитного угла Солнца [2]. В работающей в настоящее время технологии полные циклы расчетов выполняются 4 раза в сутки и включен режим приближенного учета суточного хода. Выбор режима и частота включений полного радиационного блока определяются соответствующими параметрами в файле внешней настройки SDSLST. Основным результатом работы являются величина приращения значений температуры в ячейках атмосферы за счет радиационных притоков и компонент радиационного баланса на поверхности земли, используемые для последующих вычислений термического состояния атмосферы и подстилающей поверхности.

Book_Gidromet.indb Sec1:168 13.01.2010 13:13:47

B2. Подблок конвекции

Подблок конвекции вычисляет изменение температуры и влажности в ячейках атмосферы за счет параметризованных вертикальных конвективных движений, за счет конденсации влаги в случае достижения состояния насыщения и испарения выпадающих осадков. Помимо этого, вычисляются суммы осадков конвективной природы, приращения влажности почвы и высоты снежного покрова за счет поступления конвективных осадков на подстилающую поверхность.

Для расчетов используется алгоритм проникающей конвекции КУО-74 [8], несколько модифицированный при создании версий модели с повышенным пространственным разрешением.

B3 Подблок вертикальной диффузии

Подблок вертикальной диффузии производит вычисления приращений температуры, влажности, горизонтальных компонент скорости ветра за счет вертикального турбулентного, а также осуществляет расчет значений турбулентных потоков тепла и влаги на поверхности земли, используемых для последующих вычислений характеристик подстилающей поверхности. Блок состоит из 4-х подпрограмм: определения констант и параметров и подпрограмм расчета тенденций температуры, влажности и горизонтальных компонент скорости ветра. Для приземного слоя атмосферы используются соотношения теории подобия Монина-Обухова, для пограничного слоя и свободной атмосферы — параметризация Льюиса [8].

B4. Подблок крупномасштабной конденсации

Подблок крупномасштабной конденсации производит вычисления приращений значений температуры и влажности за счет конденсации влаги и испарения осадков при их выпадении. Начало конденсации определяется при достижении в ячейке влажности насыщения, начало выпадения осадков – при соблюдении дополнительных условий (схема Кеслера). Помимо этого, выполняются вычисления приращения влажности почвы и высоты снежного покрова за счет осадков, достигших подстилающей поверхности. Подблок состоит из 2-х подпрограмм: расчета констант и параметров и собственно программы моделирования процессов крупномасштабной конденсации.

B5. Подблок расчетов на подстилающей поверхности

Подблок производит расчеты характеристик термо-влажностного состояния подстилающей поверхности (только материковых

Book_Gidromet.indb Sec1:169 13.01.2010 13:13:47

участков). В течение всего периода прогноза температура морской поверхности остается неизменной. Блок выполняет определение значений температуры и влажности деятельного слоя суши, а также — водного эквивалента снежного покрова (при его наличии). Вычисления производятся путем решения уравнения эволюции во времени температуры деятельного слоя суши как результат действия всех компонент теплового баланса земной поверхности. Для влажности почвы изменения за счет выпадения осадков производятся в блоках конвекции и крупномасштабной конденсации, в блоке расчетов процессов на подстилающей поверхности производятся вычисления только изменений влажности почвы за счет таяния снега и испарения влаги, перетекания влаги в нижележащий

Используется неявная схема интегрирования по времени. Подблок состоит из 2-х подпрограмм: вычисления констант и параметров и собственно программы вычислений характеристик подстилающей поверхности.

Г. Блок вычислений в спектральном пространстве

Вторая часть вычислений на временном шаге модели осуществляется в пространстве спектральных коэффициентов. На этом этапе решается уравнение Гельмгольца и вычисляется полунеявная части временных тенденций (п./п. TSTEP).

Далее учитывается вклад горизонтальной турбулентной диффузии. Необходимость введения данной процедуры связана с тем, что при интегрировании по времени может происходить перенос энергии по спектру в сторону высокочастотных колебаний и неправдоподобное возрастание амплитуд коротких волн вблизи границы спектрального усечения (эффект спектрального блокирования). Для этого в уравнения вносятся диффузионные члены, препятствующие паразитарному росту амплитуд высокочастотных гармоник.

После этого осуществляется переход в сеточное пространство.

Д. Блоки перехода из спектрального пространства в сеточное и обратно

На каждом временном шаге модели приходится переходить от сеточных значений к значениям спектральных коэффициентов путем использования прямого и обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ) и прямого и обратного преобразования Лежандра. Соответствующие блоки перехода могут использовать либо программу БПФ, разработанную в Европейском центре среднесрочных

Book_Gidromet.indb Sec1:170 13.01.2010 13:13:48

прогнозов погоды (ЕЦСПП), либо программу БПФ из математической библиотеки, имеющейся на ЭВМ. В настоящей оперативной технологии используется программа БПФ Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды.

После перехода в сеточное пространство (все переменные представлены в узлах широтно-долготной сетки, учет всех влияющих факторов произведен), завершается шаг по времени. Перед переходом на очередной шаг по времени производится формирование результирующего выходного массива, включающего все результаты вычислений на данном временном шаге. В случае, если номер выполненного шага совпадает с указанным во внешнем потоке одним из номеров, для которых необходим вывод результатов для обработки и представления для пользователей, формируется и записывается history-файл, содержащий результаты вычислений.

2. Структура и основные компоненты программного комплекса «Спектральная модель»

Структура технологии на основе глобальной модели T169L31 и схема ее функционирования в рамках Автоматизированной системы оперативной обработки информации (АСООИ) Гидрометцентра России показана на рис. 2. Технология состоит из следующих компонент:

– выбор и чтение информации объективного анализа данных метеорологических наблюдений из оперативных пользовательских баз данных АСООИ Гидрометцентра России SHOT, ASDB, MRFS для дальнейшего преобразования в другие виды информации, необходимые для непосредственного интегрирования уравнений модели атмосферы. При этом резервируется несколько вариантов источников входной информации при отсутствии основного из-за аварийных или сбойных ситуаций (компонента «Препрцессинг»);

– расчеты значений совокупности метеорологических характеристик с выдачей результатов каждые 6 часов по заблаговременностям в каждой точке сетки модельного пространства в сигма-системе вертикальных координат до высоты ≈10 гПа на 31 уровне с шагом ≈0,7×0,7° гауссовой широтно-долготной сетки (компонента «Модель»);

– преобразование рассчитанных моделью значений в характеристики для пользователей — перевод в другие системы вертикальных координат, интерполяция в узлы стандартных регулярных широтно-долготных сеток, расчеты по диагностическим соотношениям,

Book_Gidromet.indb Sec1:171 13.01.2010 13:13:48

статистическая коррекция результатов расчетов (компонента «Постпроцессинг»);

– запись информации в пользовательские базы данных как непосредственно рассчитанной в модели в узлах модельной системы координат, так и после интерполяции. В результате в базы данных поступает информация численных прогнозов для Северного и Южного полушарий полей геопотенциала, температуры, относительной влажности, скорости ветра на стандартных изобарических поверхностях, давления на уровне моря, осадков и облачности различного генезиса, приземной температуры и влажности воздуха, скорости ветра и т.д. На модельной сетке, помимо полей в свободной атмосфере и перечисленных элементов погоды, в базы данных записываются ряд других характеристик, целесообразных для научных исследований, важнейшими из которых являются поля различных компонент теплового и радиационного балансов земной поверхности и отдельных поверхностей в атмосфере (компонента «Постпроцессинг»);

– оценка успешности прогнозов по ПК, выпущенных за предшествующие сроки при работе технологии в оперативном режиме. При работе технологии в исследовательском режиме расчет оценок осуществляется для прогноза за срок, по которому был осуществлен численный эксперимент. Запись результатов оперативных оценок в пользовательские базы данных (компонента «Задача расчета оценок»).

2.1. Общая схема функционирования технологии

На рис. 2 пунктиром выделен программный комплекс (ПК) «Спектральная модель», являющийся подкомплексом АСООИ Гидрометцентра России. Выполнение процедур, находящихся за пределами выделенной области, теснейшим образом связано с работой ПК, но производится средствами АСООИ в рамках других задач и технологий, поэтому в настоящем документе не рассматривается. Часть из них выполняется в качестве дальнейшей обработки информации, получаемой ПК «Спектральная модель».

Для того, чтобы ПК «Спектральная модель» оперативно вычислил совокупность прогнозов по заданному сроку исходных данных, требуется предшествующее выполнение целого ряда задач сеанса обработки информации за этот срок в рамках АСООИ. Итогом предшествующей технологической цепочки является оперативное

Book_Gidromet.indb Sec1:172 13.01.2010 13:13:48

поступление полей объективного анализа (ОА) Гидрометцентра России в оперативную базу данных Гидрометцентра России [9] SHOT. В случае непоступления необходимых полей первого приближения ПК стартует с данных, вырабатываемых Глобальной системой усвоения данных (ГСУД) Гидрометцентра России, записанных в базу данных ASDB. В свою очередь, ГСУД, будучи автономной системой, не зависящей от поступления зарубежной прогностической информации, заполняет ASDB по 4-м срокам ежедневно.

Выполнение задач ПК осуществляется в 2-х параллельных сеансах счета. Суть построения такой системы заключается в том, что обработка результатов (постпроцессинг) выполняется на фоне интегрирования модели атмосферы. Таким образом, за 1—4 часа до окончания счета пользователи имеют возможность работать с прогнозами по мере их подготовки. Такая организация счета обусловлена требованиями высокой степени оперативности к информации, необходимой для выпуска синоптиками прогнозов погоды, а также — достаточно высокими вычислительными затратами (следовательно — времени счета), необходимых для выполнения ПК.

I параллельный сеанс включает в себя задачи препроцессинга и интегрирования модели. После отработки препроцессинга подготовленный этой задачей стартовый набор для модели атмосферы записывается в виде файла для последующего чтения задачей модели атмосферы. Задача «Модель атмосферы» стартует по окончании задачи «препроцессинг». Совокупность заблаговременностей (номера шагов по времени), прогнозы на которые требуется обрабатывать и записывать в базы данных, а также другая информация о режиме работы системы, задаются во внешних файлах. Как только интегрирование достигает заданного шага по времени, происходит запись результатов счета в так называеме history-файлы.

II параллельный сеанс (задача «Постпроцессинг») стартует одновременно со стартом задачи «Модель атмосферы».

Старт задачи «Препроцессинг» осуществляется по команде монитора АСООИ, при этом сообщается дата и начальный срок (путем обращения задачи к внешнему файлу и считывания информации из него). Заполнение файла с датой обеспечивается автоматически средствами АСООИ. В случае режима работы технологии в автономном (исследовательском) режиме задание даты и срока производится «вручную».

Из внешних файлов, не изменяемых в процессе оперативных процедур АСООИ и ПК «Спектральная модель», производится

Book_Gidromet.indb Sec1:173 13.01.2010 13:13:49

считывание информации, задающих режим работы модели (заблаговременности прогнозов для дальнейшей обработки, максимальная заблаговременность, конфигурация модели атмосферы).

А. Компонента «Препроцессинг»

Компонента «Препроцессинг» является обязательной компонентой при любой организации функционирования моделей атмосферы в конкретной технологической среде.

В программном комплексе «Спектральная модель» Оперативной технологии Гидрометцентра России компонента «Препроцессинг» выполняет следующие функции:

– чтение из оперативных циклических баз Гидрометцентра России полей объективного анализа и дополнительных полей — характеристик земной поверхности;

– преобразование полученной информации в начальные данные для модели атмосферы на модельной системе горизонтальных и вертикальных координат: горизонтальная и вертикальная интерполяция данных, вычисление значений необходимых элементов по диагностическим соотношениям;

– формирование стартового набора для компоненты «Модель атмосферы».

После чтения информации из баз данных Гидрометцентра России, производятся следующие вычисления:

– горизонтальная интерполяция;

– вертикальная интерполяция горизонтальных составляющих полей ветра;

– вычисление значений профилей температуры и отношения смеси по значению геопотенциала и дефицита точки росы одновременно с процедурой вертикальной интерполяции этих величин.

Горизонтальная интерполяция с сетки объективного анализа (по состоянию на 2008 г. — регулярная широтно-долготная сетка 1,25×1,25°) на вычислительную гауссову сетку модели атмосферы (для версии T169L31 размерность 512×128 узлов для каждого из полушарий с равномерным шагом по долготе и слегка меняющимся шагом по широте (около 0,7°)) производится для метеорологических элементов, прочитанных из оперативных пользовательских баз данных Гидрометцентра России:

– геопотенциальные высоты изобарических поверхностей;

– горизонтальные составляющие скорости ветра;

– дефицит точки росы.

Book_Gidromet.indb Sec1:174 13.01.2010 13:13:49

Процедуры интерполяции осуществляются одной и той же совокупностью программ в цикле по перечисленным элементам. Процедура интерполяции заключается в представлении исходных полей на сетке объективного в ряды Фурье с использованием полиномов Лежандра с последующей сборкой на гауссовой сетке. При этом максимальные волновые числа m и n определяются по соотношениям для определения максимальных волновых чисел для гауссовой сетки близкого пространственного разрешения (см. [8]).

Вертикальная интерполяция производится для получения начальных значений переменных модели атмосферы на сигма-поверхностях (огибающих рельеф) по данным полей объективного анализа на уровнях стандартных изобарических поверхностей.

Процедуры вертикальной интерполяции для горизонтальных составляющих скорости ветра выполняются независимо друг от друга для U и V. При этом используется техника сплайн-интерполяции. На уровне рельефа принимается равенство нулю значений горизонтальных составляющих скорости ветра. Поле рельефа строится предварительно при подготовке новой версии модели атмосферы в соответствии с пространственным разрешением модели и спектральным представлением переменных.

Вертикальная интерполяция температуры производится в несколько этапов:

– определение значений виртуальной температуры на стандартных изобарических поверхностях путем решения уравнения статики;

– определение значений относительной влажности воздуха по значениям дефицита точки росы (из Объективного анализа) и полученной виртуальной температуре (по соотношениям формулы Магнуса, связывающей упругость насыщения с температурой воздуха). Процедура выполняется путем итераций: *виртуальная температура — упругость водяного пара — откорректированная температура — упругость водяного пара — откорректированная температура.* Предполагается, что по окончании итерационного процесса на выходе вычисляется близкая к реальной (не виртуальная) температура воздуха и упругость водяного пара. Затем производятся вычисления относительной влажности воздуха:

– вертикальная интерполяция с использованием сплайн-технологий, полученных в предыдущих вычислениях профилей температуры;

– вертикальная интерполяция относительной влажности воздуха с предположением о ее постоянном значении в нижних слоях атмосферы;

Book_Gidromet.indb Sec1:175 13.01.2010 13:13:49

– вычисления отношения смеси по значениям относительной влажности и температуре воздуха на сигма-поверхностях.

Б. Компонента «Постпроцессинг»

Цель компоненты заключается в представлении численных результатов модели в форме, доступной и удобной для потребителя. Постпроцессинг выполняет:

– переход с модельных сигма-уровней на стандартные изобарические поверхности (вертикальная интерполяция);

– горизонтальная интерполяция метеорологических полей;

– вычисления дополнительных характеристик на основе привлечения диагностических соотношений;

– исправление систематических ошибок в прогностических полях (блок статистической коррекции);

– запись результатов прогноза в оперативные базы данных.

Работа постпроцессинга представляет собой последовательную обработку файлов (history-файлов), формируемых моделью атмосферы и содержащих результаты прогноза для одной из заданных внешними параметрами настройки последовательности заблаговременностей, заканчивающуюся записью результатов в базы данных. В связи с необходимостью скорейшего выпуска результатов прогнозов, очередной history-файл начинает обрабатываться сразу после его формирования моделью атмосферы (вычисления прогноза соответствующей заблаговременности, а в связи с большими объемами history-файлов, в оперативной технологии они уничтожаются после конца его обработки. Блок постпроцессинга запускается до начала счета модели и работает в ждущем режиме. Как только в модели сформирован history-файл, постпроцессинг получает сообщение и начинает обработку этого файла. Этот режим работы реализуется средствами LINUX.

Рассмотрим подробнее организацию вычислительных процедур, выполняемых в постпроцессинге.

1) Вертикальная интерполяция

Вертикальная интерполяция с модельных сигма-уровней на стандартные изобарические поверхности осуществляется с применением процедур кубического сплайна. Главная методологическая сложность заключается в выборе гипотез «спуска под гору», т.е. построения полей на непрерывных, пересекающих рельеф изобарических поверхностях по данным (результатам моделирования) на огибающих рельеф сигма-поверхностях для областей, оказывающихся под рельефом.

Book_Gidromet.indb Sec1:176 13.01.2010 13:13:50

В связи с этим принимаются следующие гипотезы:

– для поля влажности: с предварительным определением значений относительной влажности воздуха — гипотеза о постоянном значении относительной влажности воздуха ниже уровня рельефа, равном значению на нижнем счетном уровне;

– для горизонтальных компонент скорости ветра: о равенстве нулю ветра на 1000 гПа;

– для температуры воздуха: спуск осуществляется по влажноадиабатическому градиенту, ниже 3000 м — в предположении об изотермическом профиле;

На основании построенных профилей температуры выполняется вычисление высот геопотенциальных поверхностей с применением процедуры: *температура — виртуальная температура — геопотенциал*. Также после выполнения этих операций происходит восстановление значения полей давления на уровне моря.

После выполнения процедур вертикальной интерполяции вновь полученные поля представлены в узлах гауссовой широтно-долготной сетки, и на стандартных изобарических поверхностях.

2) Восстановление полей по диагностическим соотношениям

– Определение 6-часовых сумм осадков — по получаемым из модели накопленным суммам — производится на основе последовательной обработки history-файлов для двух «соседних» заблаговременностей. Для 12-часовых интервалов между заблаговрменностями — путем вычисления средней интенсивности за 1 час и накоплении за 6-часовой интервал.

– Определение средних значений потока скрытого тепла от подстилающей поверхности за 6-часой период по накопленным суммам.

– Определение значений полей облачности нижнего, среднего ярусов и общей облачности по эмпирическим соотношениям, связывающих значения влажности воздуха, атмосферного давления на том или ином уровне с наиболее вероятным облачным баллом в данной ячейке пространства.

– Вычисление значений приземной температуры воздуха (на уровне 2 м) и горизонтальных компонент скорости ветра (на уровне 10 м) по значениям соответствующих на нижнем счетном сигма-уровне. Для температуры привлекаются сведения о ее значении на подстилающей поверхности, для скорости ветра — гипотеза «прилипания» у подстилающей поверхности и равенстве эмпирически подобранным *Uo* и *Vo* на уровне шероховатости. Для восстановления профилей внутри приземного слоя привлекаются соотношения теории подобия Монина-Обухова.

Book_Gidromet.indb Sec1:177 13.01.2010 13:13:50

3) Горизонтальная интерполяция

Горизонтальная интерполяция осуществляется путем разложения двумерных полей, представленных на модельной гауссовой сетке, в ряды по сферическим функциям с последующим восстановлением их на регулярной сетке 1,25×1,25°.

Для полей, имеющих большую пространственную изменчивость (поля осадков, приземные температура и скорость ветра, облачность), используются процедуры билинейной интерполяции. В результате информация предоставляется на регулярной сетке 1,25×1,25°. Непосредственно перед записью полей в пользовательские базы данных, производится «прореживание» для получения информации на сетке 2,5×2,5°.

3. Прогностические технологии Гидрометцентра России, базирующиеся на глобальном численном моделировании

Специфика задач ММЦ-Москва определяет приоритетность развития технологий глобального атмосферного моделирования.

Основными расчетными технологиями, определяемыми уровнем глобальной прогностической модели Гидрометцентра России, являются:

– система усвоения данных наблюдений;
– система статистической интерпретации (MOS);
– система диагноза и прогноза деятельного слоя океана;
– численный прогноз ветрового волнения;
– системы диагностики и верификации с использованием комплексных диагностических показателей (показатели бароклинности, фронтальные параметры);
– системы расчетов информации для авиационных прогнозов (высота тропопаузы, характеристики слоя конвекции, характеристики струйных течений);
– система ансамблевых прогнозов.

Наряду с этим, результаты численного глобального прогноза в достаточно большом объеме используются оперативными прогнозистами, наряду с информацией таких ведущих прогностических центров, как ЕЦСПП или Экзетер. Причина заключается в более широкой номенклатуре продукции, доступной из отечественной модели атмосферы на сетках сравнительно высокого пространственного разрешения. Остановимся на описаниях 2-х видов продукции — детерминированного и ансамблевого прогнозов (последний находится в стадии разработки).

Book_Gidromet.indb Sec1:178 13.01.2010 13:13:50

3.1. Поступление прогностической продукции для составления оперативных прогнозов погоды

Основным назначением глобальной модели атмосферы является выпуск гидродинамических прогнозов для всего земного шара. Такой охват территории необходим по целому ряду причин, важнейшей из которых является необходимость воспроизведения эволюции процессов планетарного масштаба, что, в свою очередь, необходимо при интегрировании (прогнозировании процессов) на несколько суток вперед. При этом достаточно достоверные результаты могут быть получены при прогнозе крупномасштабных барических структур. Однако, следует иметь в виду сокращение продолжительности периодов полезного прогноза при уменьшении пространственно-временного масштаба метеорологических явлений (от 1—2 недель для прогнозов конфигурации движений в средней атмосфере до 1—2 суток при прогнозировании явлений на фронтальных разделах), а также — принципиальную невозможность явного прогнозирования явлений пространственных масштабов, размеры которых либо меньше, либо соизмеримы с размерами ячеек модели атмосферы (например, летние конвективные осадки). (См. рис. 2).

Тем не менее, список прогнозируемых элементов, востребованных специалистами-синоптиками, постоянно расширяется (см. таблицу 1). Наиболее успешным и полезным оказывается прогнозирование элементов погоды для всей России — облачности, фронтальных осадков, приземной температуры.

Основными потребителями данного вида продукции являются прогностические центры Росгидромета, выпускающие прогнозы погоды на сроки 1—3 суток. Для получения и визуализации продукции в оперативном режиме в прогностических центрах требуется наличие специальных технологий, обеспечивающих прием и раскодирование данного вида информации. Стандартным способом передачи по каналам связи является использование возможностей ГСТ ВМО (Глобальной телекоммуникационной сети Всемирной метеорологической организации) с последующей обработкой (раскодирование, архивация, визуализация) специализированными ГИС (например, ГИС Метео). Однако в последнее время все более успешно осуществляется реализация технологий, основанная на возможностях сети Интернет.

При использовании результатов глобального моделирования необходимо помнить об особенностях качества данного вида прогнозов.

Book_Gidromet.indb Sec1:179 13.01.2010 13:13:51

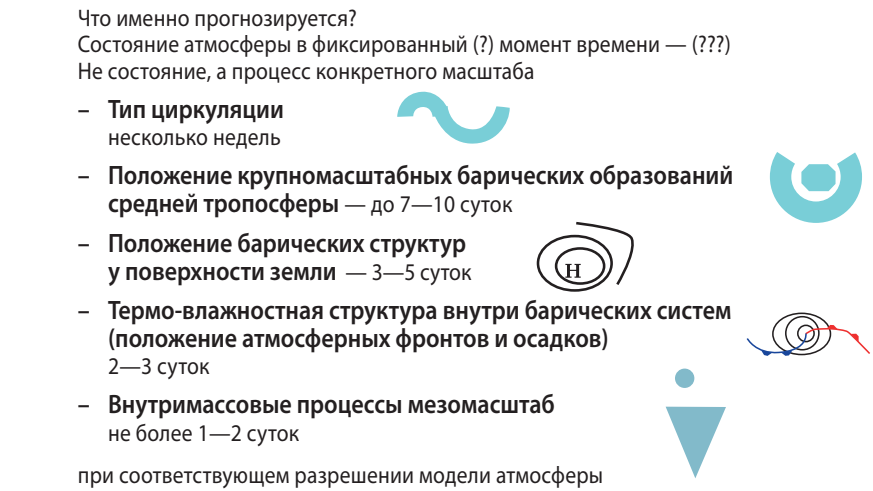


Рис. 3. Степень предсказуемости явлений погоды, связанных с атмосферными процессами различного пространственного масштаба.

Среди особенностей можно выделить:

– близкая (сопоставимая) успешность прогнозов над различными регионами,

– повышение надежности прогнозов по мере увеличения пространственно-временных масшабов атмосферных движений,

– достижение периодов полезного прогноза движений в средней тропосфере до 6 суток.

Среди ограничений применимости продукции следует иметь в виду недостаточно высокую пространственную детализацию. В результате можно говорить лишь о фоновых значениях элементов приземной погоды (например, приземной температуры воздуха), исключив особенности метеорологического режима в следствие сложных природных условий (морское побережье, горный рельеф). Для отдельных элементов погоды (температуры) указанный недостаток можно частично исправить путем введения корректирующих алгоритмов, способных «убрать» или снизить систематические ошибки, связанные с местными особенностями. Однако такой элемент, как осадки, такому виду коррекции практически не поддается. В этом случае, возможно, могут оказаться эффективными алгоритмы вероятностного прогноза.

Book_Gidromet.indb Sec1:180 13.01.2010 13:13:51

Таблица 1

Год	На сетке 2,5×2,5°, GRIB	На сетке 1,25×1,25°, GRIB	По пунктам (тексты)
2002	Стандарт: Давление на уровне моря, высоты изобарических поверхностей, температура, влажность, скорость ветра на стандартных изобарических поверхностях (GRIB, цифровое факсимиле)	Нет	Нет
2003	Стандарт (см. 2002), помимо: • балл общей, средней, нижней облачности • осадки	Нет	Нет
2004	Стандарт (см. 2002), помимо: • балл общей, средней, нижней облачности • осадки • приземная температура	Стандарт, помимо: • балл общей, средней, нижней облачности • осадки • приземная температура	Нет
2005	Стандарт (см. 2002), помимо: • балл общей, средней, нижней облачности • осадки • фаза осадков (снег/дождь) • приземная температура • балл общей, средней, нижней облачности	Стандарт, помимо: • балл общей, средней, нижней облачности • осадки • фаза осадков (снег/ дождь) • приземная температура	• приземная температура воздуха в 00, 06, 12, 18 UTC • суммы осадков за ночь и день, включая их продолжительность и фазу (снег/дождь)
2006	Стандарт (см. 2002), помимо: • балл общей, средней, нижней облачности • осадки, • фаза осадков (снег/дождь), • приземная температура • балл общей, средней, нижней облачности, • приземная температура	Стандарт, помимо: • балл общей, средней, нижней облачности • осадки + приводный ветер • фаза осадков (снег/дождь) • приземная температура	• приземная температура воздуха в 00, 06, 12, 18 UTC • суммы осадков за ночь и день, включая их продолжительность и фазу (снег/дождь)

Book_Gidromet.indb Sec1:181 13.01.2010 13:13:52

3.2. Развитие системы глобального ансамблевого прогноза на краткие и средние сроки

Развитие методов наблюдений и численного моделирования приводит к постепенному уменьшению этих ошибок, однако, совсем устранить их невозможно (так, например, данные наблюдений всегда будут содержать инструментальную ошибку, модели всегда будут иметь конечное разрешение). Так как атмосфера — хаотическая система и ее динамика описывается нелинейными уравнениями, малые ошибки (возникающие как за счет неточности начальных данных, так и за счет неточности описания физических процессов) при интегрировании модели атмосферы могут быстро расти, путем нелинейных взаимодействий распространяться на большие масштабы и, в конечном счете, приводить к потере предсказуемости, что происходит неравномерно в пространстве и во времени. Единственным практическим средством, позволяющим оценить вариации предсказуемости в различных регионах в зависимости от начального состояния атмосферы и дать вероятностный прогноз, отражающий эти вариации, является метод ансамблевого прогнозирования, цель которого — описать эволюцию плотности распределения состояний атмосферы во времени как можно точнее.

Ансамблевая система кратко- и среднесрочного прогнозирования, разработанная и реализованная в Гидрометцентре России, основана на использовании спектральной модели атмосферы с разрешением 85 гармоник и 31 уровень по вертикали и модифицированных блоков пре- и постпроцессинга оперативной технологии среднесрочного прогноза. В системе учитываются только неопределенности прогнозов, связанные с неточностью начальных данных о состоянии атмосферы, т.е. ансамбль представляет собой совокупность прогнозов, стартующих со слегка различающихся начальных данных. Соответствующий ансамбль начальных данных генерируется с помощью бридинг-метода. Этот метод, называемый еще методом выращивания наиболее быстро растущих мод, является наиболее простым из всех разработанных на настоящее время и требует наименьших компьютерных ресурсов. Ансамбль состоит из 11 членов, из них 5 пар прогнозов по возмущенным данным и 1 контрольный прогноз (т.е. прогноз по невозмущенным начальным данным).

Система ансамблевого прогноза была реализована в 2007 г. на двухпроцессорном сервере (на базе процессоров Xeon, 2.8 Ггц, ОЗУ

Book_Gidromet.indb Sec1:182 13.01.2010 13:13:52

2 Гб, L2 кэш 512 Кб, L1 кэш 8 Кб) в операционной системе LINUX. В настоящее время система функционирует в режиме реального времени и ежедневно выдается прогноз на 10 суток по сроку 12 ВСВ.

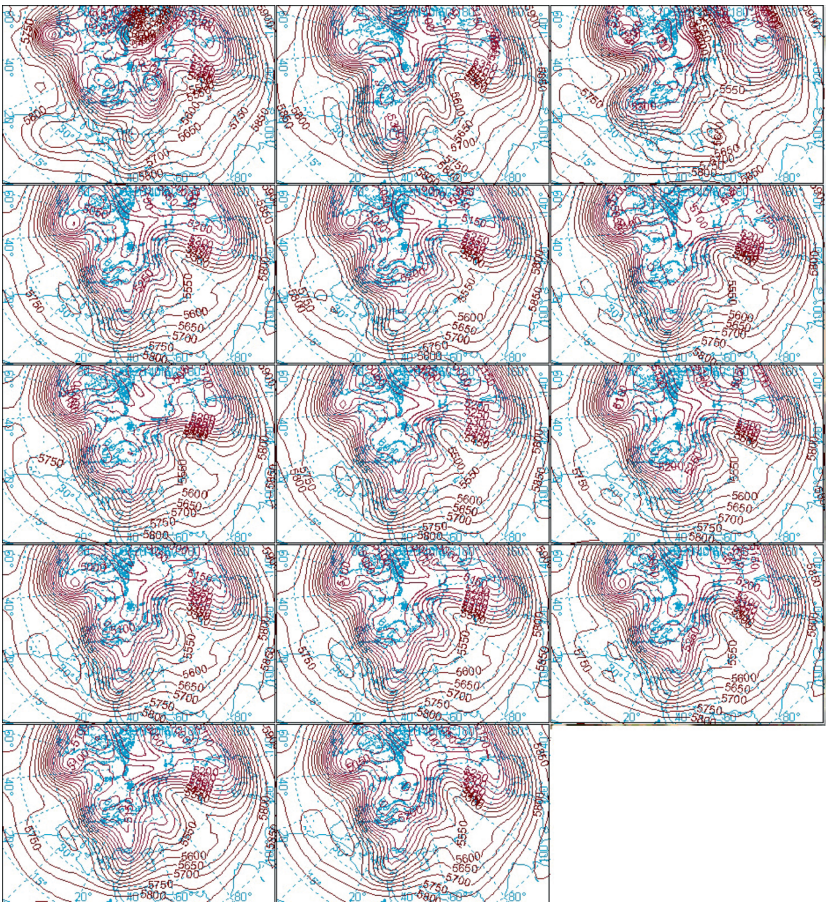


Рис. 4а. Пример результата работы ансамблевой системы «Почтовые марки». Высота геопотенциальной поверхности 500 гПа: левая картинка в верхнем ряду — анализ за срок 12 ВСВ 2 декабря (из БД SHOT), остальные картинки — 7-суточный прогноз по данным за 25 ноября 2007 г. срок 12 ВСВ: сверху вниз, слева направо — оперативный прогноз по спектральной модели (из БД SELF), прогноз по полулагранжевой модели (из БД LAG1); контрольный прогноз по ансамблевой системе (из БД EPSS) и возмущенные прогнозы (из БД EPSS).

Book_Gidromet.indb Sec1:183 13.01.2010 13:13:52

По мере усиления вычислительных мощностей Гидрометцентра России, планируется ввести продукцию системы ансамблевого прогноза в практику оперативного выпуска прогнозов погоды, одновременно реализовав технологические изменения, связанные с распространением новых видов продукции.

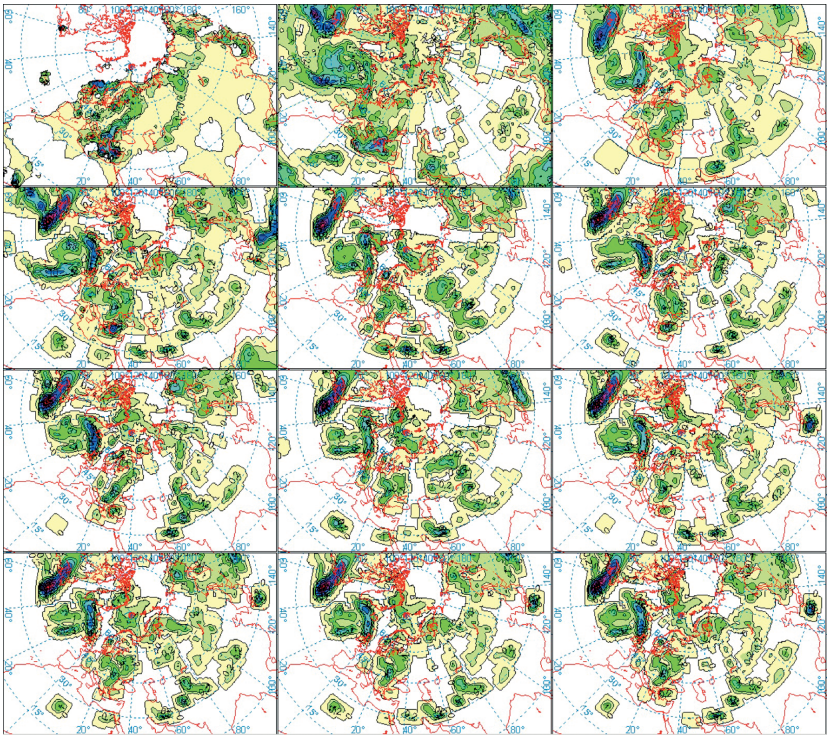


Рис. 4б. Пример результата работы ансамблевой системы «Почтовые марки». Поле осадков: левая картинка в верхнем ряду — анализ за срок 12 ВСВ 2 декабря (из БД SHOT), остальные картинки — 7-суточный прогноз по данным за 25 декабря 2007 г. срок 12 ВСВ: сверху вниз, слева направо — прогноз по полулагранжевой модели (из БД LAG1), оперативный прогноз по спектральной модели (из БД SELF); контрольный прогноз по ансамблевой системе (из БД EPSS) и возмущенные прогнозы (из БД EPSS).

На рис. 4а, 4б, 4в показаны примеры продукции системы ансамблевых прогнозов.

Book_Gidromet.indb Sec1:184 13.01.2010 13:13:54

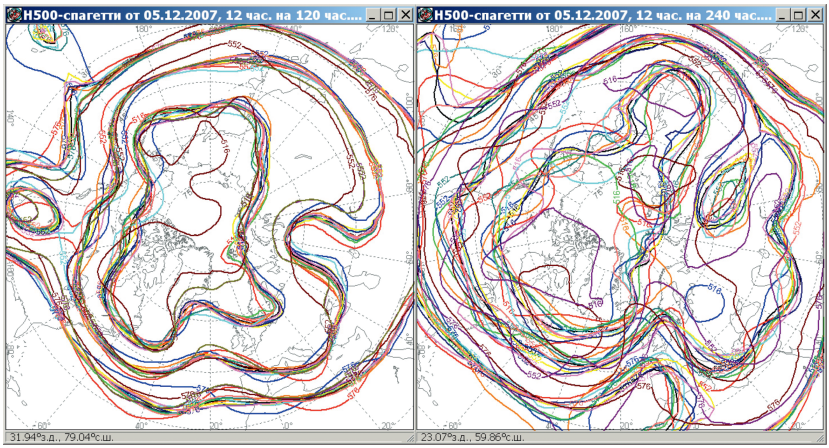


Рис. 4в. Примеры карт «Спагетти».
Высота геопотенциальной поверхности 500 гПа (изогипсы 516, 552 и 576 дкм). Продукция разработанной Системы ансамблевого прогноза для прогнозов с заблаговременностью 120 (слева) и 240 (справа) часов от 12 часов ВСВ 5 декабря 2007 года.

4. Текущие задачи развития глобальной прогностической технологии

В период 2007—2009 гг. в Гидрометцентре России велись активные работы по разработке новых версий спектральной модели атмосферы T169L31 и T339L31 с пространственным разрешением в умеренных широтах ≈60 км и 35 км соответственно.

Работы велись в двух следующих направлениях.

4.1. Оптимизация программного кода

Первое направление заключалось в оптимизации вычислений, поскольку главное назначение разрабатываемой версии — оперативный численный прогноз. Необходимо было добиться более высокого уровня использования компьютерных ресурсов. Перспективы ожидаемой технической модернизации и прибытия в ММЦ-Москва многопроцессорной компьютерной техники стимулировали деятельность по обновлению кодов модели атмосферы, в частности и в первую очередь — распараллеливания вычислений. Для выполнения этих работ, во-первых, были изучены основы современных

Book_Gidromet.indb Sec1:185 13.01.2010 13:13:55





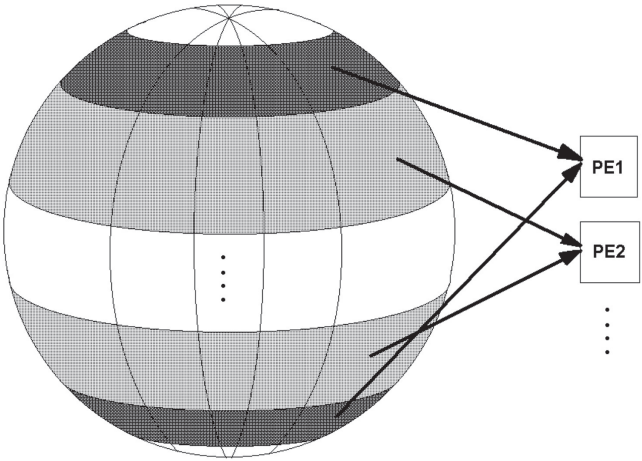
техник распараллеливания, во-вторых, модифицировано программное обеспечение. В-третьих, были выполнены тестовые расчеты на многопроцессорных компьютерах. Последний вид работ частично вошел в деятельность по официальному тестированию высокопроизводительной техники в рамках тендера. В результате были получены обновленные коды модели атмосферы, позволяющие не только производить вычисления на многопроцессорной технике, но и полностью свободные от «жестких» размерностей, соответствующих пространственному разрешению по горизонтали и вертикали. Таким образом, благодаря достигнутой «универсальности», формально были созданы работающие версии T339L31, T679L31, успешность прогнозов которых в 2005—2009 гг. не рассматривалась (выполнялись единичные численные эксперименты, без необходимой инфраструктуры верификации результатов), но, тем не менее, существование этих версий позволило выполнить необходимые тесты на быстродействие вычислительных машин.

В целях более полного использования ресурсов вычислительной техники была поставлена задача разработки версий модели атмосферы, способных с максимальной эффективностью функционировать на многопроцессорных ЭВМ. В результате была разработана новая версия программного обеспечения спектральной модели атмосферы. Для этого была использована технология MPI (Message Passing Interface): эта технология позволяет выполнять параллельные вычисления на многопроцессорных системах как с памятью, разделяемой между процессорами, — SMP (Symmetric Multiprocessing) машины — так и с распределенной памятью и выполнена одномерная декомпозиция области расчетов. Дополнительное привлечение средств SHMEM позволило сократить время на межпроцессорные взаимодействия. С помощью полученного программного обеспечения можно выполнять расчеты на любом количестве процессоров, не превышающем половину числа гауссовых широт, используемых моделью. Программное обеспечение протестировано на многопроцессорных ЭВМ с разделяемой памятью, основанных на процессорах Intel Itanium. В качестве тестов, для «утяжеления» расчетов, были созданы версии T339L31 и T679L31 спектральной модели атмосферы.

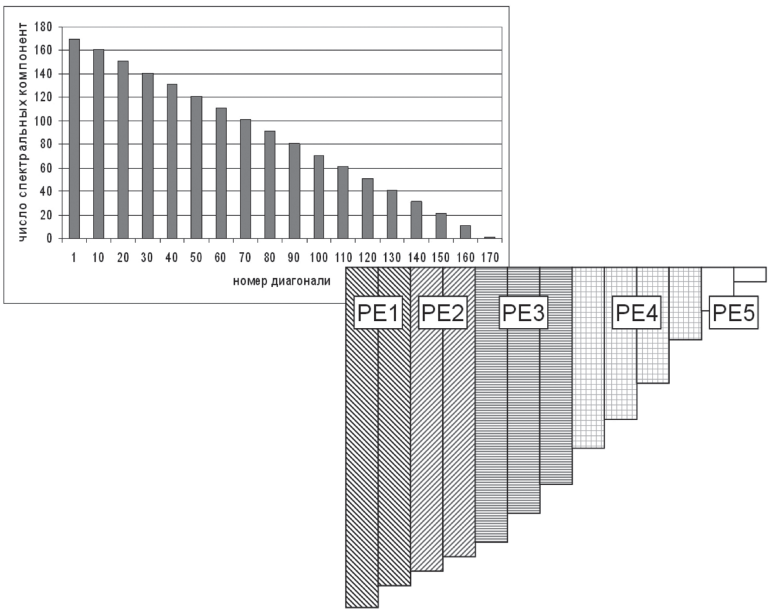
Основной задачей при оптимизации программного комплекса спектральной модели атмосферы являлось создание варианта, способного функционировать с одновременным использованием нескольких процессоров на многопроцессорной ЭВМ. Главной

Book_Gidromet.indb Sec1:186

13.01.2010 13:13:56



а)



б)

Рис. 5.1. Декомпозиция области вычислений: а) в сеточном пространстве; б) в спектральном пространстве. PE — процессорный элемент.

проблемой при создании параллельной версии любой большой программы является оценка независимости отдельных фрагментов расчетов и декомпозиция вычислений. Желательно также начать параллельную часть программы на как можно более раннем этапе счета.

Выполнив некоторые изменения в программах спектральной модели атмосферы, создали ее новую версию, в которой вычисления в функционирующих в спектральной модели подпрограммах SCAN1 и SCAN2 для различных широт независимы. Далее была использована такая декомпозиция области, при которой все процессоры обрабатывали бы по возможности равное число широт. Единственным ограничением при «раздаче» широт процессорам явилось требование парности северной и южной широты. Ограничение связано с тем, что некоторые вычисления для северной широты используются в расчетах для симметричной ей относительно экватора южной широты (см. выше). Таким образом, минимальное число широт, которое может обрабатывать каждый процессор — 2; максимально возможное число процессоров, используемых для вычислений, определяется как половина числа модельных широт. Использованная в сеточном пространстве декомпозиция представлена на рис. 5.1а, из которого видно, что каждый процесс выполняет вычисления для двух одинаковых широтных зон, расположенных симметрично относительно экватора. Заметим, что полюса не включены в расчетную сетку модели.

В спектральном пространстве была использована также одномерная декомпозиция, но по спектральным числам. Т.к. в модели используется треугольное усечение спектральных рядов, то объемы вычислений, производимых для различных спектральных компонентов, оказываются различными. Поэтому приходится перераспределять загрузку процессоров для достижения баланса. Декомпозиция, использованная в пространстве спектральных коэффициентов, представлена на рис. 5.1б.

При запуске задачи инициируется N одинаковых MPI процессов, где число N определяется пользователем. Этап предварительных вычислений выполняется всеми процессами одновременно. Т.к. эти вычисления выполняются только один раз при интегрировании модели и не требуют много времени, последовательный характер этой части кода несущественен. Параллельная работа программы начинается с вызова разработанной программы ALLOCNRANRB, в которой выделяются основные массивы для работы модели.

Разработанный параллельный алгоритм был подробно протестирован на ЭВМ с разделяемой памятью. Расчеты выполнялись на 4-,

Book_Gidromet.indb Sec1:188 13.01.2010 13:13:57

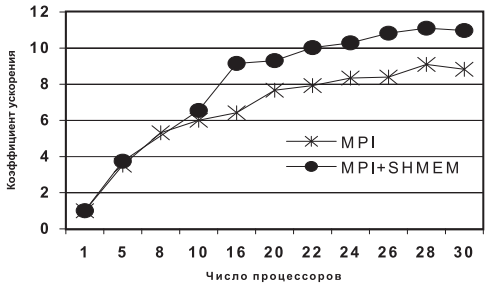


Рис. 5.2. Уменьшение времени счета модели T339L31 при увеличении числа используемых процессоров. По оси ординат отложено отношение времени численного интегрирования.

12-, 32- и 64-процессорных SMP компьютерах, основанных на процессорах Itanium. Возможность проведения расчетов была любезно предоставлена нам компаниями Intel и Silicon Graphics.

Рис. 5.2 демонстрирует уменьшение времени счета модели T339L31 при увеличении числа используемых процессоров. По оси ординат отложено отношение времени численного интегрирования модели на сутки на одном и на нескольких процессорах, по оси абсцисс — число процессоров. Видно, что при числе процессоров менее 20 кривая растет достаточно быстро. Увеличение количества используемых процессоров свыше 30 приводит лишь к небольшому ускорению программы за счет того, что время, требуемое на обмены, оказывается сопоставимым с временем, затраченным на реальные вычисления.

Таким образом, был создан параллельный вариант спектральной модели атмосферы, с использованием которого можно выполнять расчеты на большом числе процессоров, но не превышающем половины числа гауссовых широт. При этом получаемое уменьшение астрономического времени счета ограничено из-за: 1) больших обменов данными между процессорами при расчете спектральных коэффициентов; 2) наличия последовательного куска в итоговом коде.

4.2. Отладка, изучение свойств и чувствительности новой версии T169L31

Второе направление заключалось в отладке, изучении свойств и чувствительности к различным факторам новой рабочей версии модели атмосферы T169L31. Несмотря на то, что в течение 2005—2008 гг. ММЦ-Москва располагал весьма слабой вычислительной техникой,

Book_Gidromet.indb Sec1:189 13.01.2010 13:13:58

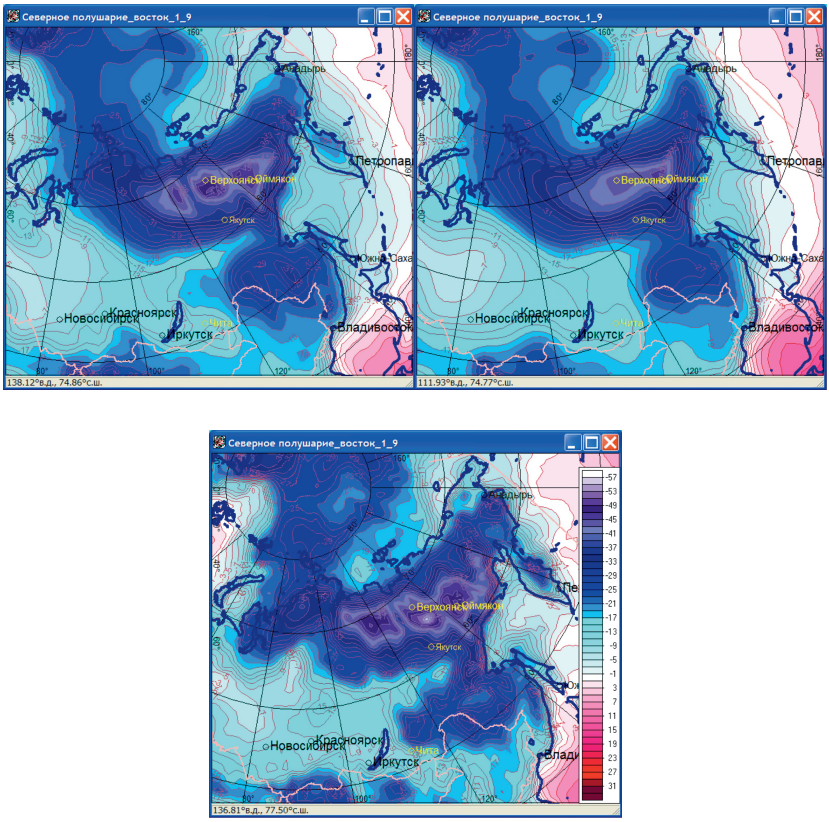


Рис. 5.3. Прогнозы приземной температуры на 13 декабря 2008 г. по T169L31 (слева) и T85L31 (справа), объективный анализ — внизу.

тем не менее, оказалась реальной организация в конце 2007 г. квазиоперативного функционирования версии. Результаты новой версии по сериям прогнозов за 00 и 12 UTC регулярно записываются в специально созданные общедоступные базы данных. Этому предшествовало большое количество численных экспериментов, выводы по результатам которых позволили существенно повысить успешность прогнозов.

В результате была разработана новая версия глобальной спектральной модели атмосферы T169L31. В настоящее время (начиная с декабря 2007 г.) модель работает в режиме опытной эксплуатации, вычисляя

Book_Gidromet.indb Sec1:190 13.01.2010 13:13:58

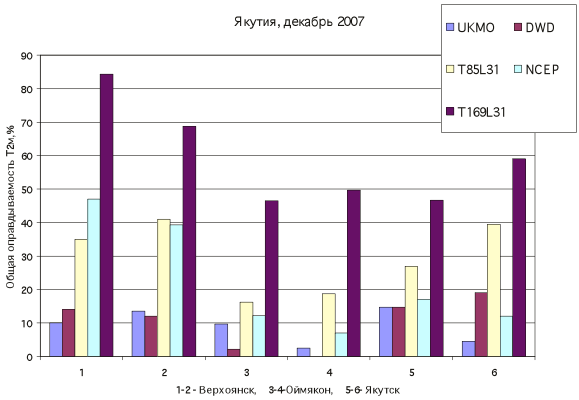


Рис. 5.4. Примеры осредненных оценок общей оправдываемости прогнозов приземной за 5—14 декабря 2007 г. до 48 часов по пунктам: Верхоянск, Оймякон, Якутск. Соседние группы столбцов относятся к прогнозам по данным за 00 и 12 UTC.

прогнозы ежедневно по срокам за 00 и 12, результаты регулярно попадают в общедоступные базы данных Гидрометцентра России.

На основе выводов по исследованиям чувствительности новой версии модели были выполнены работы по усовершенствованию подготовки стартовых наборов. Наибольшая чувствительность была выявлена к алгоритмам построения полей рельефа и профилей температуры в сигма-системе координат. За счет этих изменений, а также — модификаций, выполненных в алгоритмах определения коэффициента горизонтальной диффузии, новая версия модели атмосферы показала превышение уровня оценок по сравнению с версией T85L31 как в толще атмосферы, так и по прогнозам элементов приземной погоды. При этом для приземной температуры в Сибирском регионе уровень прогнозирования приземной температуры на краткие сроки практически сравнялся с уровнем зарубежных моделей (NCEP, UKMO, DWD). (См. рис. 5.3, 5.4).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Астахова Е.Д.* Исследовательская технология численного среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, 2002, вып. 338. С. 17—25
2. *Астахова Е.Д., Круглова Е.Н.* Учет суточного хода радиации в спектральной модели среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра СССР // Метеорология и гидрология, 1991, №6. С. 12—22

Book_Gidromet.indb Sec1:191 13.01.2010 13:14:00

3. *Багров А.Н., Локтионова Е.А., Цырульников М.Д.* Развитие оперативного объективного анализа в Гидрометцентре России // Труды Гидрометцентра России, СПб.: Гидрометеоиздат, 2000, вып. 334. С. 19—30.
4. *Булдовский Г.С., Розинкина И.А., Фролов А.В.* Об успешности прогнозов метеорологических полей на основе глобальной спектральной модели атмосферы высокого пространственного разрешения T85L31 на 1-10 суток // Информационный сборник № 29, СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. С. 3—16.
5. *Булдовский Г.С., Розинкина И.А., Акимов И.В.* Об успешности гидродинамических прогнозов осадков в зимний период года, выпускаемых на базе глобальной спектральной модели Гидрометцентра России T85L31 // Информационный сборник № 30, СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. С. 3—14.
6. *Важник А.И.* Схема вертикальной интерполяции для дискретной четырехмерной системы усвоения данных наблюдений // Метеорология и гидрология, 1996, № 10. С. 15—27.
7. *Веселова Г.К., Розинкина И.А., Фролов А.В.* Прогноз осадков по спектральной модели атмосферы Гидрометцентра СССР с заблаговременностью до 36—78 часов // Информационный сборник № 25, СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 3—20.
8. *Курбаткин Г.П., Дегтярев А.И., Фролов А.В.* Спектральная модель атмосферы, инициализация и база данных для численного прогноза погоды. СПб, Гидрометеоиздат, 1994, 184 с.
9. *Пурина И.Э., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Штырова Н.В.* Развитие информационных технологий в локальной сети CRAY // Труды Гидрометцентра России, СПб.: Гидрометеоиздат, 2000, вып. 334. С. 134—147.
10. *Розинкина И.А., Киктев Д.Б., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В.* Оперативный выпуск гидродинамических прогнозов погоды на средние сроки по спектральной модели Гидрометцентра России // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, 2001, вып. 334. С. 52—68.
11. *Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Фролов А.В., Цветков В.И., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В.* Особенности реализации новой версии спектральной модели Гидрометцентра России T85L31 и технологии выпуска кратко- и среднесрочных гидродинамических прогнозов // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, 2002, вып. 338.
12. *Фролов А.В.* Среднесрочный прогноз погоды с использованием спектральной модели // Метеорология и гидрология, 1991, № 11. С. 25—32.
13. *Фролов А.В., Важник А.И., Цветков В.И., Астахова Е.Д.* Глобальная спектральная модель атмосферы с высоким разрешением по вертикали // Метеорология и гидрология, 2000, № 2. С. 12—20.
14. *Фролов А.В., Важник А.И., Свиренко П.И., Цветков В.И.* Глобальная система усвения данных наблюдений о состоянии атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 188 с.
15. *Фролов А. В., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я., Цветков В.И.* О практической предсказуемости метеорологоических полей, получаемых на основе спектральной модели атмосферы T85L31 Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология, 2004, № 1. С. 1—14.
16. *Фролов А.В., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Цветков В.И., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В.* О практической предсказуемости метеорологических величин с помощью глобальной спектральной модели Гидрометцентра России. // Метеорология и гидрология, 2004, № 5. С. 5—19.

Book_Gidromet.indb Sec1:192 13.01.2010 13:14:00

Полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ

М.А. Толстых
Гидрометцентр России, Институт вычислительной математики РАН
Н.Н. Богословский, А.В. Шляева, А.Ю. Юрова
Гидрометцентр России

1. Введение

Полулагранжев метод представления адвекции, применяемый в большинстве глобальных моделей среднесрочного прогноза погоды, позволяет использовать в модели атмосферы шаг по времени в несколько раз больший, чем шаг, определяемый условием Куранта. В настоящее время подавляющее большинство глобальных гидродинамических моделей прогноза погоды основано на полулагранжевом подходе.

Начало разработки глобальной полулагранжевой модели ПЛАВ относится к 1995 году, когда появилась статья Рэя Бэйтса и Йонга Ли [1], посвященная разработке полулагранжевой двумерной модели мелкой воды на сфере, на основе уравнения потенциального вихря. Тогда М.А. Толстых была предложена альтернативная формулировка модели мелкой воды на сфере, применяющая компактные разностные схемы четвертого порядка [2], которая обеспечивала более высокую точность и вычислительную эффективность. Затем стало ясно, что разработать на основе уравнения потенциального вихря эффективную трехмерную модель невозможно, и в качестве базового уравнения было выбрано уравнение для вертикальной компоненты абсолютной завихренности.

Изначально главной задачей при разработке модели ставилась максимальная точность при минимальных вычислительных затратах, поэтому желательным казалось применение несмещенной по горизонтали сетки (или сетки A согласно Аракаве [3]), позволяющей избежать вычисления нескольких траекторий для каждой ячейки сетки в полулагранжевой модели, а также применение двумерных операторов осреднения. Однако, как известно из классической работы [3], на сетке A в традиционной формулировке уравнений атмосферы плохо описываются процессы распространения инерционно-гравитационных волн. Применение пары «вертикальный компонент абсолютной завихренности — горизонтальная дивергенция» в качестве прогнос-

Book_Gidromet.indb Sec1:193 13.01.2010 13:14:00

тических переменных позволяет использовать в конечно-разностной полулагранжевой модели несмещенную сетку, обеспечив при этом такие же характеристики распространения гравитационных волн, как на сетках B и C и несколько лучшие для инерционно-гравитационных волн и волн Россби [4, 5].

Существенным элементом для модели атмосферы, основанной на переменных «вертикальный компонент абсолютной завихренности — горизонтальная дивергенция» является быстрый и точный алгоритм восстановления компонент горизонтальной скорости ветра, описанный в [6]. В этой работе также было показано, что двумерная на сфере версия модели ПЛАВ на стандартном для моделей мелкой воды наборе тестов на наиболее сложных тестах достигла уровня ошибок, характерного для спектральной модели эквивалентного разрешения. В [7] была представлена трехмерная версия модели, которая тогда имела разрешение 1,5° по долготе и широте, 20 уровней по вертикали. В дальнейшем разрешение модели повышалось, и стала необходимой эффективная параллельная реализация модели, представленная в [8, 9]. Параллельное ускорение тестовой версии модели с разрешением 0,225×0,18° по долготе и широте и 28 уровнями по вертикали, достигнутое на вычислительной системе SGI Altix 4700, представлено на рис. 1.

Таким образом, в итоге была реализована вычислительно эффективная полулагранжева глобальная конечно-разностная модель общей циркуляции атмосферы, получившая имя «ПЛАВ» (от Полу-Лагранжева, основанная на уравнении Абсолютного Вихря, в анг-



Рис. 1. Параллельное ускорение тестовой версии модели.

Book_Gidromet.indb Sec1:194 13.01.2010 13:14:01

лийском варианте SL-AV). Особенностями блока решения уравнений динамики атмосферы модели ПЛАВ являются применение конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых уравнений и использование вертикальной компоненты абсолютного вихря и дивергенции в качестве прогностических переменных.

Версия полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ с разрешением 0,9 градуса по долготе, 0,72° по широте и 28 уровнями по вертикали успешно прошла оперативные испытания и внедрена в Гидрометцентре России. Существует также версия модели, ориентированная на сезонные прогнозы (см. далее).

2. Параметризации процессов подсеточного масштаба

Модель включает в себя набор параметризаций процессов подсеточного масштаба (коротко- и длинноволновая радиация, глубокая и мелкая конвекция, планетарный пограничный слой, торможение гравитационных волн, параметризация тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью), разработанный в Метео-Франс и метеослужбах консорциума LACE (Limited Area modeling for Central Europe) (http://www.rclace.eu) для французской глобальной оперативной модели ARPEGE и региональной модели международного консорциума ALADIN [10].

Параметризация глубокой конвекции основана на подходе «потока массы» [11], но включает многочисленные усовершенствования [12], в том числе, в схеме учитываются нисходящие потоки по краям облака [13], а также перераспределение импульса вследствие конвекции [14].

В отличие от оригинальной параметризации, в модели ПЛАВ в схеме глубокой конвекции применяется замыкание типа Куо в случаях, когда температура на нижнем модельном уровне ниже определенного порогового значения, иначе применяется замыкание на основе конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE) [15]. Параметризация мелкой конвекции реализована как расширение вертикальной диффузии и представлена в [16] со следующей модификацией: мелкая конвекция может быть активизирована, только если существует влажная потенциальная неустойчивость.

В модели применяется полуэмпирическая параметризация пропорции облачности в ячейке сетки, в основном соответствующая [17]. Предполагается, что пропорция облачности в ячейке сетки

Book_Gidromet.indb Sec1:195 13.01.2010 13:14:01

экспоненциально зависит от средней крупномасштабной пропорции облачного конденсата. Последняя вычисляется диагностически с помощью эмпирического профиля критической относительной влажности, зависящего только от вертикальной координаты. Показатель экспоненты, в свою очередь, зависит от крупномасштабной относительной влажности.

Метод вычисления радиационных потоков основан на двухпотоковом приближении [18], однако в модели применяется более новая версия параметризации длинноволновой радиации, разработанная группой RC-LACE под руководством Ж.-Ф. Желена. Новая версия отличается уточненными передаточными функциями газов (водяного пара, углекислого газа, озона) и усовершенствованным учетом спектрального перекрытия этих газов.

В модель включена параметризация процессов на поверхности суши ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere) [19, 20]. В параметризации ISBA учитывается влияние растительности на суточный ход испарения, способность растительности перехватывать и испарять поступившие на нее осадки, а также тепловая инерция растительности. Кроме того, в модель включены и расширения этой параметризации, касающиеся промерзания и оттаивания почвы [21], а также параметризация влияния снега на альбедо и излучательную способность поверхности [22].

Параметризация ISBA требует информации о физиографических характеристиках поверхности (процент песка и глины, глубина деятельного слоя почвы, преобладающий тип растительности, альбедо почвы и растительности, листовой индекс, поверхностное сопротивление). Набор климатических данных на модельной сетке подготовлен по данным ECOCLIMAP [23], которые получены главным образом по результатам спутниковых измерений и имеют разрешение 1 км для процентного содержания песка и глины в почве, 10 км для остальных характеристик.

Вертикальный турбулентный перенос импульса, тепла и влаги в приземном слое описан с использованием теории Монина-Обухова для различных типов стратификации. Выше, в планетарном пограничном слое, применяется K-теория с модифицированным числом Ричардсона. Схема турбулентного обмена на поверхности и в свободной атмосфере основана на работах [24, 25] и включает в себя многочисленные усовершенствования. В частности, в параметризацию планетарного пограничного слоя введена «интерактивная» длина перемешивания, что обеспечило лучшее воспроизведение

Book_Gidromet.indb Sec1:196 13.01.2010 13:14:01

вертикальных профилей горизонтальной скорости и температуры в погранслое для устойчивой стратификации.

Модель также включает параметризацию гравитационно-волнового сопротивления орографического происхождения (см. [26] и ссылки в этой работе).

3. Реализация конечно-элементной схемы интегрирования уравнения гидростатики

По мере накопления опыта, модель ПЛАВ подвергалась различным усовершенствованиям. Одним из отмеченных недостатков на начальном этапе развития модели являлась заметная отрицательная средняя ошибка геопотенциала в верхней стратосфере, особенно в приполярных областях Южного полушария (на уровнях 20—30 гПа). Известно [27], что возможной причиной такого смещения является недостаточная точность расчета геопотенциала, который получается, как и во всех гидростатических моделях атмосферы, путем интегрирования уравнения гидростатики. В Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) для расчета интеграла по вертикали была использована конечно-элементная схема вместо разностной формулы средней точки и показано заметное снижение отрицательной средней ошибки в стратосфере [27].

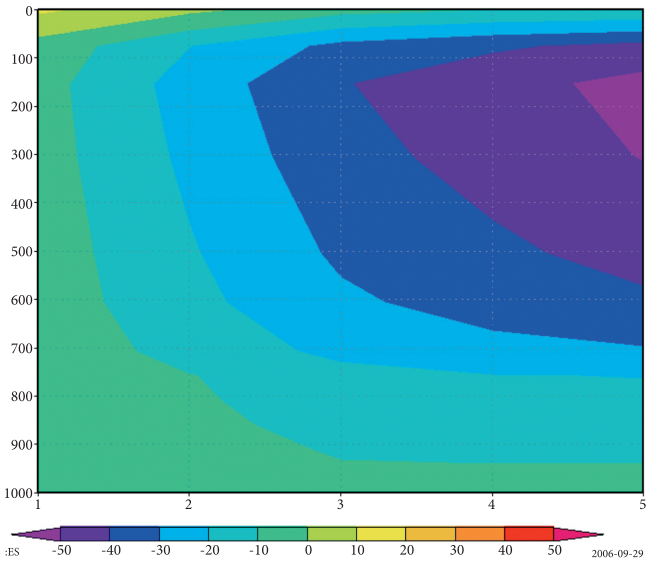
Конечно-элементная дискретизация по вертикали, описанная в [27], разработана для модели с полулагранжевой адвекцией. В качестве базисных функций применяются кусочно-линейные функции или B-сплайны. В комментариях [28] к статье [27] доказано, что без учета граничных условий указанная конечно-элементная схема интегрирования при использовании линейных базисных функций на равномерной сетке имеет четвертый порядок точности.

В связи с более высокой точностью, конечно-элементная схема интегрирования по вертикали была применена в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды ПЛАВ к уравнениям гидростатики и неразрывности. В качестве базисных функций были выбраны кусочно-линейные функции. Также была исследована возможность применения B-сплайнов в качестве базисных функций, однако была выявлена сильная чувствительность решения в зависимости от расположения модельных уровней по вертикали, что входит в противоречие с небольшим количеством уровней по вертикали в модели.

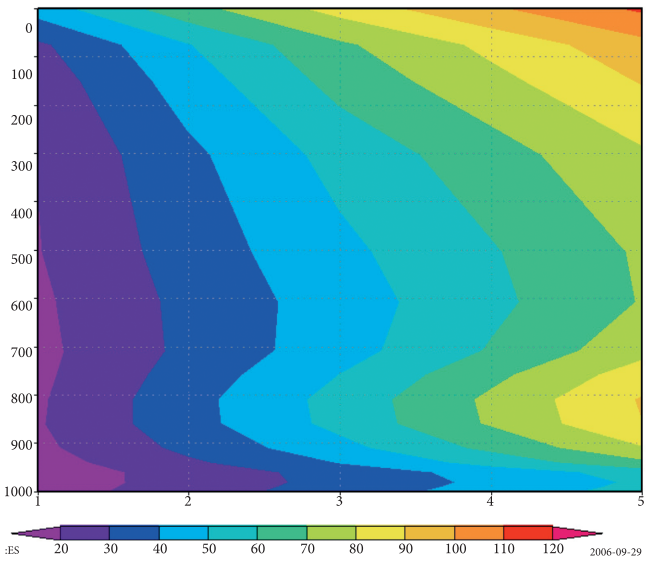
Для оценки изменений в качестве прогнозов погоды при использовании конечно-элементной схемы интегрирования по вертикали

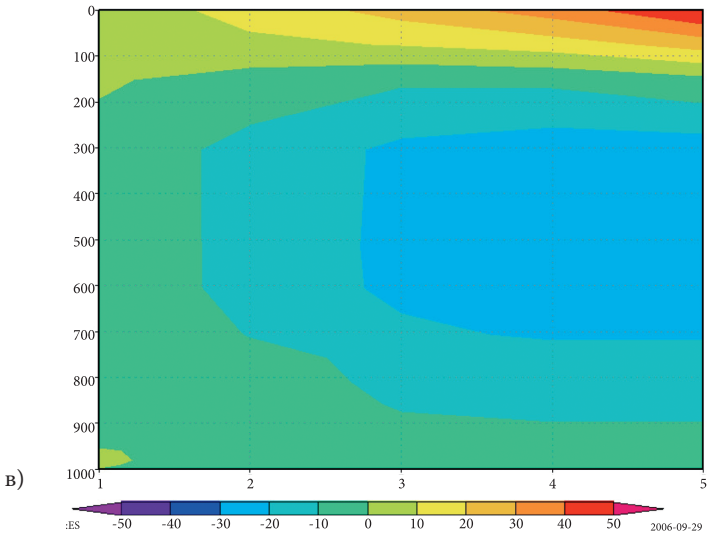
Book_Gidromet.indb Sec1:197 13.01.2010 13:14:02

а)

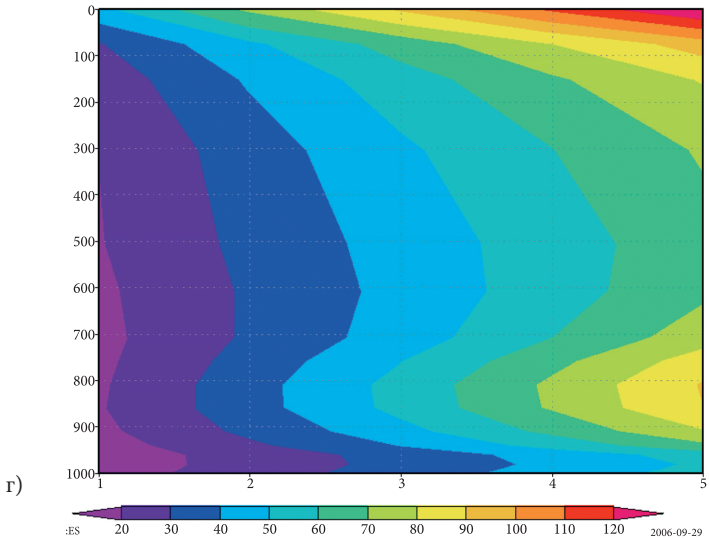

0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1
2
3
4
5
:ES
-50
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40
50
2006-09-29

б)


0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1
2
3
4
5
:ES
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
2006-09-29



в)



г)

Рис. 2. Средняя и среднеквадратичная ошибка, осредненная за август 2005 г по южному полушарию. (а, б — конечно-разностная схема, в, г — конечно-элементная схема, по оси абсцисс — дни прогноза, по оси ординат — вертикальные уровни, гПа).

Book_Gidromet.indb Sec1:199 13.01.2010 13:14:03

были рассчитаны две серии из 30 прогнозов сроком на 120 часов для августа 2005 года с использовавшейся ранее конечно-разностной схемой интегрирования и с конечно-элементной схемой. В качестве начальных данных использовались анализы, полученные в результате работы системы усвоения данных на базе данной модели [29].

На рис. 2 приведены осредненные отклонения для полученных значений геопотенциала для южного полушария в зависимости от модельного уровня и дня прогноза, а также осредненные среднеквадратичные ошибки для южного полушария.

Рисунки показывают, что применение конечно-элементной схемы в целом слабо влияет на качество прогнозов в нижней и средней тропосфере, однако существенно уменьшает среднюю и среднеквадратичную ошибку в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Для северного полушария в августе 2005 г. также получены заметные улучшения в качестве прогнозов в стратосфере.

Также были рассчитаны серии из 30 прогнозов сроком на 120 часов для декабря 2005 года. Результаты, полученные для северного полушария, аналогичны результатам для южного полушария в августе — существенно уменьшается средняя и среднеквадратичная ошибка в верхней стратосфере. Для южного полушария изменения в качестве прогнозов незначительные.

4. Усвоение данных для приземных и почвенных переменных

В глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2007 году была реализована новая параметризация физических процессов подсеточного масштаба на поверхности суши [19] с учетом растительности (ISBA, Interaction Soil Biosphere Atmosphere). Эта параметризация весьма чувствительна к заданию начальных значений для температуры и влагосодержания почвы, поэтому, впервые в России, была реализована схема усвоения для этих переменных. В данной схеме, ввиду отсутствия оперативных наблюдений для параметров почвы, для коррекции значений почвенных переменных в каждой точке сетки используются инкременты анализа температуры (T_{2m}) и влажности (RH_{2m}) на высоте 2-х метров. Реализованная схема коррекции почвенных переменных, предложенная D. Giard и E. Bazile [20], инициализирует следующие переменные: поверхностную температуру почвы (T_s), температуру глубинного слоя почвы (T_p), влагосодержание приповерхностного (ω_s) и глубинного слоя почвы (ω_p).

Book_Gidromet.indb Sec1:200 13.01.2010 13:14:04

Метод коррекции температуры почвы основан на вычислении инкремента анализа температуры на высоте 2-х метров в каждой точке сетки:

$$\Delta T_s = \Delta T_{2m} \quad \Delta T_p = \Delta T_{2m}/2\pi, \tag{1}$$

где Δ обозначает инкремент, т.е. разность значений анализа и значений поля первого приближения (6-часовой прогноз, стартовавший 6 часов назад).

Коррекция влагосодержания поверхностного слоя почвы ω_s и основного слоя почвы ω_p линейно вычисляется из разности поля первого приближения и поля анализа для приземных переменных посредством оптимальной интерполяции

$$\begin{aligned} \Delta\omega_s &= \alpha_s^T \Delta T_{2m} + \alpha_s^H \Delta RH_{2m} \\ \Delta\omega_p &= \alpha_p^T \Delta T_{2m} + \alpha_p^H \Delta RH_{2m} \end{aligned}, \tag{2}$$

где $\alpha_s^T, \alpha_s^H, \alpha_p^T, \alpha_p^H$ — оптимальные коэффициенты, минимизирующие среднеквадратичные ошибки температуры и относительной влажности на уровне 2 м, которые зависят от структуры почвы, локального солнечного времени и характеристик подстилающей поверхности.

Данная схема коррекции почвенных переменных была реализована для полулагранжевой глобальной модели прогноза погоды ПЛАВ с постоянным разрешением. Разрешение модели составляет 0,9° по долготе, 0,72° по широте; вертикальное разрешение — 28 уровней. В модель была включена параметризация ISBA [19]. В качестве начальных данных для модели использовались анализы т.н. СУД ИОИ Гидрометцентра [29], полученные в результате работы системы усвоения данных на базе модели ПЛАВ.

Схема усвоения для почвенных переменных была протестирована в полном цикле усвоения, начиная с 30 апреля 2007 г. В качестве стартовых значений почвенных переменных использовались климатические значения, предполагалось, что за две недели усвоение приведет их в соответствие с наблюдаемыми значениями. Первые результаты, однако, оказались неутешительны, качество прогнозов приземной температуры не выдерживало никакой критики. Анализ результатов показал, что влагосодержание глубинного слоя почвы за почти месяц эксперимента практически не изменилось, а объективные анализы приземной температуры и влажности, вырабатываемые в рамках СУД ИОИ, имеют заметную среднюю ошибку

Book_Gidromet.indb Sec1:201 13.01.2010 13:14:04

по отношению к данным наблюдений SYNOP, в особенности анализ приземной относительной влажности.

Таким образом, возникла необходимость в улучшении качества анализа температуры и влажности на уровне 2 м. Были разработаны объективные анализы этих величин для версии модели с горизонтальным разрешением — 0,9° по долготе, 0,72° по широте.

4.1. Объективный анализ приземной относительной влажности

В качестве входной информации используются станционные данные SYNOP и SHIP: температура точки росы и температура (для каждой станции по ним определяется относительная влажность, которая и используется для анализа влажности на высоте 2 м) и поле первого приближения, являющееся 6-часовым прогнозом модели ПЛАВ, стартующим с предыдущего цикла анализа.

Алгоритм разработанного объективного анализа основан на схеме оптимальной интерполяции и соответствует алгоритмам, применяемым в ECMWF [30] и в модели HIRLAM [31]. В рассматриваемом методе ковариационная матрица ошибок содержит зависимость не только от расстояния по горизонтали, но и от разности высот. Функция корреляции имеет следующий вид:

$$\mu_{ij} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{r_{ij}}{R}\right)^2 + \left(\frac{z_{ij}}{Z}\right)^2\right]\right), \qquad (3)$$

где r_{ij} — расстояние между точками i и j, z_{ij} — разность высот между точками i и j, R — коэффициент, задающий радиус корреляции, Z — максимальная разность высот коррелирующих между собой точек.

По сравнению с анализом СУД ИОИ используется большее количество наблюдений в каждом узле сетки (число станций ограничено пятьюдесятью, а не восемью). Для близко расположенных станций в реализованном алгоритме анализа генерируется так называемое «супернаблюдение», являющееся средним арифметическим наблюдений, находящихся друг от друга на расстоянии меньше заданного. Еще одним отличием объективного анализа от анализа СУД-ИОИ является использование наблюдений на суше (море) для анализа только в точках сетки, которые расположены над сушей (морем).

В реализованном анализе возможно задание различных радиусов корреляции для разных широт, а также различных радиусов корреляции для океана и суши. Радиусы корреляции задаются отдельно для

Book_Gidromet.indb Sec1:202 13.01.2010 13:14:04





«широтных полос» на суше и для океана. Были установлены бо́льшие значения радиусов корреляции для южного полушария и для океана, а также для арктической части северного полушария (т.к. в этих регионах меньше наблюдений). Радиусы корреляции для этих регионов равны 350—400 км, для части северного полушария — 280—300 км. Радиус влияния для всех регионов равен 800 км. Радиус минимального расстояния между наблюдениями (для генерации супернаблюдений) установлен равным 30 км. На рис. 3 приведены средняя и среднеквадратическая ошибки анализа относительной влажности по сравнению с наблюдениями за 1—27 ноября 2007 г. (срок 00 ВСВ). Графики для других регионов и сроков похожи на представленные на рис. 3, однако по региону Европа средняя и среднеквадратические ошибки анализа СУД ИОИ меньше.

Из рис. 3 следует, что разработанный анализ имеет в 2—14 раз меньшую среднюю ошибку, а также в 1,5—2 раза меньшую среднеквадратичную ошибку относительной влажности.

4.2. Вариационное усвоение данных для приземной температуры

Для модели ПЛАВ с постоянным разрешением был также реализован двумерный вариационный алгоритм усвоения для приземной температуры. Подробно этот алгоритм представлен в работе [32].

Особенностью алгоритма является то, что для задания ковариационной матрицы **B** использовалась следующая функция:

$$\rho_{\lambda,\perp}(\Theta,z)=\left(1+\mu\,\frac{\sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\lambda}{2}\right)}\right)\cdot\max\left[0,\left(1-\frac{\sin\left(\frac{\Theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\lambda}{2}\right)}\right)\right]^{\mu}\cdot\left(1+\mu\,\frac{z}{Z}\right)\cdot\max\left[0,\left(1-\frac{z}{Z}\right)\right]^{\mu}$$

где λ — коэффициент, задающий радиус корреляции, Θ — угловое расстояние между двумя точками в радианах, z — разность высот между двумя точками, Z — максимальная разность высот коррелирующих между собой точек, $\mu = 4$ — масштабирующий параметр. Функция такого вида была предложена в [33], но для учета разности высот двух точек было введено дополнительное слагаемое.

Тестирование вариационного алгоритма анализа приземной температуры проводилось в полном цикле усвоения. Использовалась одна и та же версия модели ПЛАВ, включающая в себя параметризацию процессов на поверхности ISBA. Проведена оценка качества анализа при использовании вариационного анализа (2D-Var) и анализа ОИ, входящего в состав СУД ИОИ [29]. В качестве оценок были

Book_Gidromet.indb Sec1:203

13.01.2010 13:14:05

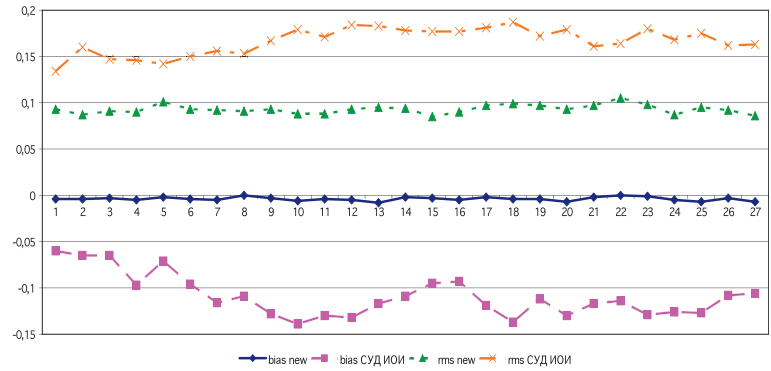


Рис. 3. Средняя (bias) и среднеквадратичная (rms) ошибки (в долях единицы) относительной влажности на уровне 2 м для разработанного анализа и анализа СУД ИОИ (срок 00 часов ВСВ, Азия, ноябрь 2007 г.).

выбраны средняя и среднеквадратическая ошибка температуры на уровне 2 м относительно данных наблюдений SYNOP. В таблице 1 приведены ошибки объективного анализа приземной температуры для срока 12 ВСВ за октябрь 2007 года.

Таблица 1

Регион, источник анализа	Среднеквадратическая Ошибка	Абсолютная ошибка	Средняя ошибка
Европа СУД ИОИ	2,164	1,378	–0,368
Европа 2d-var	2,183	1,318	0,253
Азия СУД ИОИ	1,798	1,310	–0,793
Азия 2d-var	1,580	1,061	–0,165
Европ. Россия СУД ИОИ	1,057	0,861	–0,674
Европ. Россия 2d-var	0,798	0,609	–0,056

Из таблицы 1 видно, что разработанный объективный анализ приземной температуры в регионе Европа имеет примерно такую же среднеквадратическую и абсолютную ошибку, что и анализ СУД ИОИ, однако средняя ошибка несколько ниже. Для регионов Европейская Россия и Азия абсолютная и среднеквадратическая ошибки заметно ниже, чем в анализе СУД ИОИ. Средняя же ошибка по этим

Book_Gidromet.indb Sec1:204 13.01.2010 13:14:05

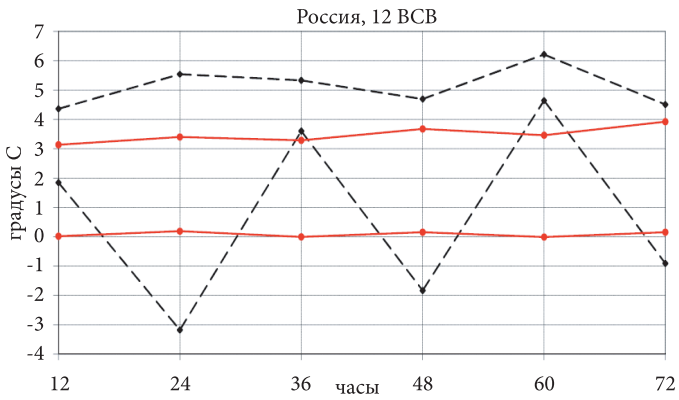


Рис. 4. Среднеквадратическая (верхняя пара кривых) и средняя (нижняя пара кривых) ошибка прогнозов T_{2m}, стартовавших в 12 ВСВ, относительно данных наблюдений, осредненные за 5—27 июня 2007 г. Сплошная линия: применение новых схем задания начальных данных и новой параметризации. Пунктирная линия: старая параметризация + данные СУД ИОИ без разработанных схем усвоения.

двум регионам в несколько раз меньше, чем у анализа СУД ИОИ. Это особенно важно для работы реализованной схемы усвоения почвенных переменных.

Разработка новых объективных анализов для приземной температуры и влажности позволила в итоге успешно запустить схему усвоения почвенных переменных. Было выполнено сравнение качества прогнозов при использовании всех новых методов усвоения данных и модели ПЛАВ с параметризацией ISBA и прогнозов со старой версией модели, в которой использовалась старая параметризация, данные усвоения СУД ИОИ, а схема усвоения для почвенных переменных и разработанные алгоритмы анализа приземной температуры и влажности отсутствовали. На рис. 4 приведены ошибки численного прогноза погоды на срок 72 часа для температуры на уровне 2 м, осредненные за 5—27 июня 2007 г., при применении всех новых подходов, а также при использовании старой параметризации и данных системы усвоения СУД ИОИ. Два верхних графика соответствуют среднеквадратическому отклонению, а два нижних — средней ошибке.

Видно, что применение новых схем дает существенно меньшие ошибки. Это показывает эффективность новой параметризации и хорошо согласованной с ней системы усвоения почвенных

Book_Gidromet.indb Sec1:205 13.01.2010 13:14:06

переменных, а также разработанных объективных анализов приземной температуры и относительной влажности. Среднеквадратичная ошибка прогноза T_{2m} по Европе уменьшилась в среднем на 0,8°, во всех остальных регионах среднеквадратичная ошибка уменьшилась в среднем на 0,7°. Особенно заметно уменьшилась средняя ошибка.

Результаты, приведенные в настоящем разделе, показывают, что совместное использование новых объективных анализов, параметризации ISBA и схемы коррекции для почвенных переменных позволяют улучшить прогноз температуры и относительной влажности на уровне 2 м. С лета 2007 г. глобальная полулагранжева модель применяет параметризацию ISBA, анализы T_{2m} и RH_{2m}, а также схему коррекции почвенных переменных в оперативном режиме.

5. Результаты среднесрочных прогнозов модели ПЛАВ

С момента практической реализации в 2003 году версии модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением 0,9×0,72°, 28 уровней по вертикали, она постоянно развивалась: усовершенствовались численные алгоритмы модели, внедрялись более совершенные параметризации процессов подсеточного масштаба, произошел переход на автономную систему подготовки начальных данных для модели. Частично эти работы описаны в настоящей статье. Все эти работы закономерно привели к улучшению качества среднесрочных прогнозов, показанному на рис. 5.

На рис. 6 представлены среднеквадратические ошибки прогнозов геопотенциала поверхности 500 гПа и температуры на уровне 850 гПа

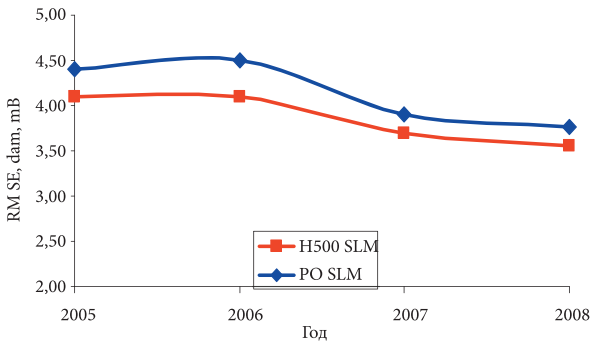


Рис. 5. Среднеквадратическая ошибка прогноза H500 и P0. Заблаговременность 72 часа. Исходный срок 12 UTC. 2005—2008 гг. Регион: Северное полушарие.

Book_Gidromet.indb Sec1:206 13.01.2010 13:14:06

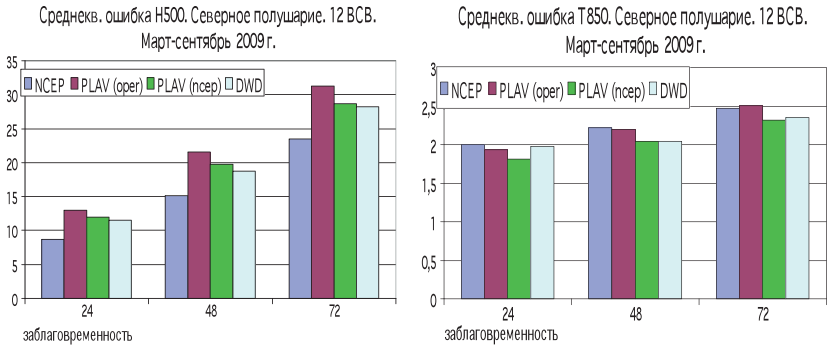


Рис. 6. Среднеквадратические ошибки прогнозов геопотенциала поверхности 500 гПа и температуры на уровне 850 гПа на третьи сутки по внетропической части Северного полушария за период с марта по сентябрь 2009 года.

на третьи сутки по внетропической части Северного полушария за период с марта по сентябрь 2009 года по отношению к объективному анализу Гидрометцентра России. Ошибки приведены для американской модели NCEP; модели ПЛАВ, стартующей с начальных данных объективного анализа Гидрометцентра России; модели ПЛАВ, стартующей с начальных данных модели NCEP; модели немецкой метеослужбы.

Рис. 6 показывает, что улучшение качества начальных данных для модели ПЛАВ способно заметно улучшить качество прогнозов при неизменной модели.

В экспериментальном варианте модели ПЛАВ было повышено вертикальное разрешение с 28 до 50 уровней при неизменном горизонтальном разрешении 0,9×0,72°. По сравнению с исходным вариантом, существенно повысилось количество вертикальных уровней: в слое от 1000 до 850 гПа — с 7 до 14, при этом разрешение здесь стало более равномерным; в слое от 300 до 150 гПа теперь 6 уровней вместо 4 (см. рис. 7).

Соответствующие изменения были внесены и в технологию подготовки начальных данных на модельных уровнях (квазиусвоение данных). С новыми версиями модели и технологии подготовки начальных данных были выполнены численные эксперименты по квазиусвоению за период с 1 по 30 ноября 2008 г., а затем рассчитаны прогнозы с заблаговременностью 3 суток с полученных начальных данных.

Оказалось, что повышение вертикального разрешения существенно не изменило большинство показателей успешности прогнозов, за исключением средней ошибки температуры и геопотенциала на уровнях выше 400 Мб. При повышении количества уровней существенно

Book_Gidromet.indb Sec1:207 13.01.2010 13:14:06

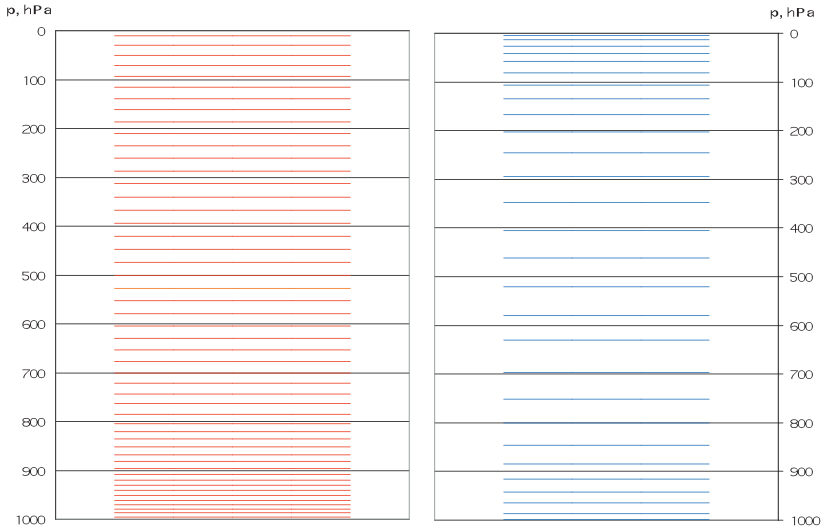


Рис. 7. Распределение уровней по вертикали в варианте модели ПЛАВ с 50 уровнями (слева) и 28 уровнями (справа).

уменьшилась средняя положительная ошибка геопотенциала и температуры в этой части и менее заметно уменьшилась небольшая отрицательная ошибка на уровнях ниже 500 гПа. (На рис. 8 показаны среднемесячные средние ошибки поля геопотеницала и ветра на уровне 250 гПа, а также среднеквадратичные ошибки геопотенциала 250 гПа). Можно предположить, что данному недостатку в исходной версии модели способствовала неточная работа параметризации погранслоя при существенно неравномерном разбиении и малом количестве уровней в нем. Эта гипотеза может подтверждаться улучшением воспроизведения приземной температуры в ночное время (см. рис. 9).

Следует также отметить уменьшение средней ошибки модуля ветра на уровне 250 гПа почти в два раза, на уровне 500 гПа — на 30% при почти неизменной среднеквадратичной ошибке. При оценке воспроизведения характеристик максимального ветра среднеквадратическая ошибка для скорости практически не изменилась, зато для высоты уровня отмечено небольшое улучшение при прогнозе на 24 часа.

В настоящее время ведутся работы по настройке следующей версии модели ПЛАВ, предназначенной для среднесрочного прогноза. Эта версия имеет горизонтальное разрешение 0,45° по долготе, 0,37°по широте, 50 уровней по вертикали.

Book_Gidromet.indb Sec1:208 13.01.2010 13:14:07

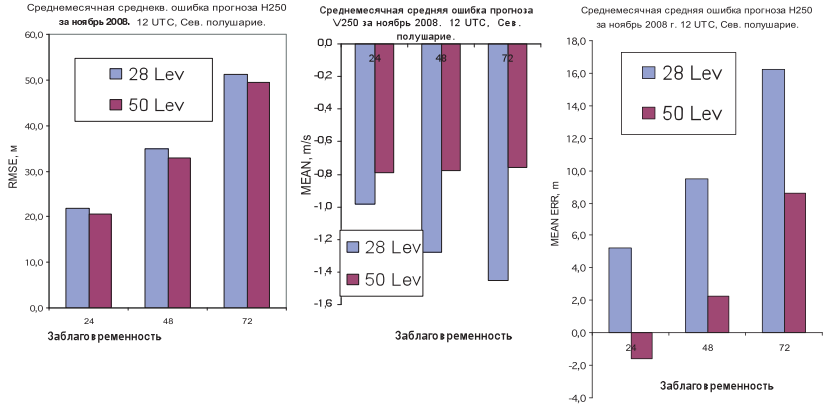


Рис. 8. Среднемесячные ошибки прогноза некоторых полей за ноябрь 2008 г.

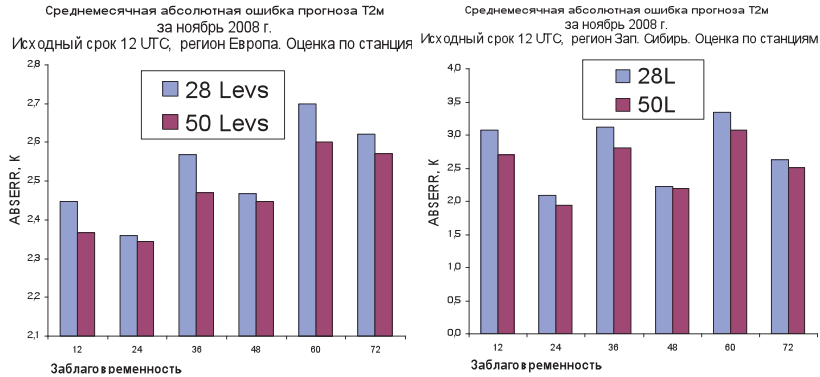


Рис. 9. Абсолютная ошибка прогноза приземной температуры за ноябрь 2008 г.

6. Результаты моделирования среднесезонной циркуляции с помощью модели ПЛАВ

Версия модели ПЛАВ, предназначенная для сезонного прогноза, имеет разрешение 1,40625° по долготе, 1,125° по широте, 28 сигма-уровней по вертикали. Шаг по времени составлял 36 мин.

Были выполнены численные эксперименты с полулагранжевой моделью атмосферы с представленным выше набором параметризаций по расчету ретроспективных сезонных прогнозов согласно протоколу международного эксперимента SMIP-2/HFP, нацеленно-

Book_Gidromet.indb Sec1:209 13.01.2010 13:14:07

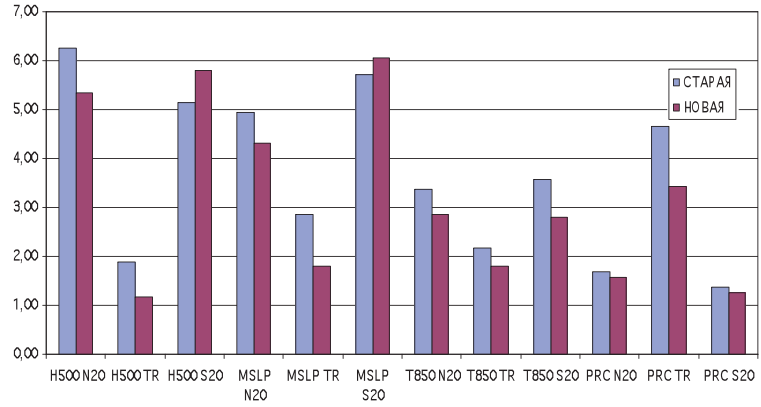


Рис. 10. Среднеквадратические ошибки полей высоты поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (MSLP), температуры поверхности 850 гПа (T850), осадков (PREC) по отношению к полям реанализа, осредненные по всем сезонным прогнозам за 25 лет. S20 — внетропическая часть Южного полушария (90—20° ю.ш.), TR — тропики (20° ю.ш — 20° с.ш.), N20 — внетропическая часть Северного полушария (20—90° с.ш.). Единицы: H500 — дам, давление на уровне моря — Мб, T850 — градусы, осадки — мм/сут.

го на оценку практической предсказуемости на сезонных временных масштабах. В качестве начальных данных и для верификации экспериментов применялись реанализы-2 NCEP/NCAR. При расчете прогнозов по этому протоколу не используется никакая информация из будущего, меняющееся в ходе прогноза поле температуры поверхности океана (ТПО) задается с использованием простой схемы эволюции температуры поверхности океана. Подробно методология экспериментов по сезонным прогнозам, а также результаты описаны в [34].

Результаты этих экспериментов сравнивались с результатами расчетов по предыдущей версии модели, которая отличалась отсутствием параметризации процессов на поверхности суши ISBA, а также более старыми версиями параметризации радиации и пограничного слоя атмосферы.

Были рассчитаны ансамбли сезонных прогнозов за 25 лет для каждого из четырех сезонов. Оценки точности воспроизведения атмосферной циркуляции (средняя и среднеквадратическая ошибки, коэффициент пространственной корреляции отдельно по всему Земному шару, по тропикам, по внетропическим частям северного и южного полушария) сравнивались с результатами аналогичных

Book_Gidromet.indb Sec1:210 13.01.2010 13:14:08

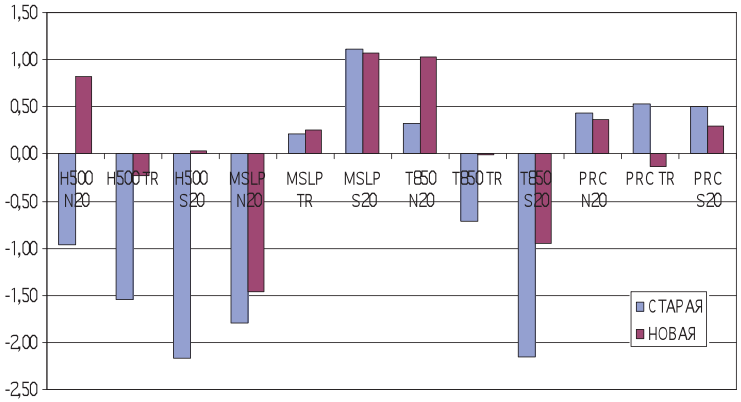


Рис. 11. Средние ошибки полей высоты поверхности 500 гПа (H500), давления на уровне моря (MSLP), температуры поверхности 850 гПа (T850), осадков (PREC) по отношению к полям реанализа, осредненные по всем сезонным прогнозам за 25 лет. S20 — внетропическая часть Южного полушария (90—20° ю.ш.), TR — тропики (20° ю.ш — 20° с.ш.), N20 — внетропическая часть Северного полушария (20—90° с.ш.). Единицы: H500 — дам, давление на уровне моря — Мб, T850 — градусы, осадки — мм/сут.

расчетов по старой версии модели. Эти оценки рассчитывались для полей высоты поверхности 500 гПа, давления на уровне моря, температуры на уровне 850 гПа (T850) и осадков. Среднеквадратические отклонения указанных переменных от полей реанализа для старой и новой версий модели приведены на рис. 10, а средние ошибки — на рис. 11.

В современной версии модели существенно улучшились все оценки всех полей в тропиках. Например, для поля давления на уровне моря среднеквадратическая ошибка уменьшилась в среднем в 1,6 раза (для расчетов атмосферной циркуляции на зимний и летний периоды — в 2 раза). Для T850 та же ошибка уменьшилась примерно на 0,4° (или на 17%), для осадков уменьшение этой ошибки составило 27%.

Во внетропических зонах северного и южного полушарий оценки в среднем изменились менее заметно по сравнению с тропиками, за исключением ошибок T850. Среднеквадратическая ошибка T850 уменьшилась на 0,5° в северном полушарии и 0,7° в южном в среднем за 4 сезона, при этом в зимний период соответствующего полушария ошибка T850 почти не изменилась, а в летний — заметно уменьшилась.

Book_Gidromet.indb Sec1:211 13.01.2010 13:14:08

Эти улучшения во многом можно отнести за счет появления в модели параметризации процессов на поверхности суши, включая растительность. Действительно, растительность многократно увеличивает испарение с модельной поверхности, поэтому в новой версии модели появились осадки в приэкваториальной Южной Америке.

Заметное уменьшение ошибки T850 над Антарктидой, вероятно, связано с учетом льда на поверхности в параметризации ISBA, а также несколько улучшенным описанием устойчивого пограничного слоя.

7. Параметризация болот

Параметризация горизонтальных неоднородностей в поле влажности почвы является одним из приоритетных направлений развития параметризаций процессов на поверхности суши в моделях прогноза погоды [35]. В умеренной лесной (бореальной) зоне и в особенности на территории Сибири пространственная картина влагосодержания почвы (торфа) существенно неоднородна за счет многочисленных болот. Глубина грунтовых вод в болотах невелика (максимум 60—70 см), и поверхность оказывается временно или постоянно насыщенной. Физические и экологические свойства болот существенно отличают их от соседствующих водораздельных пространств, и формирование стока и испарения с болот имеет специфические черты.

Для уточнения расчетов потоков тепла и влаги над заболоченными территориями в глобальной полулагранжевой модели численного прогноза погоды ПЛАВ в используемой схеме описания поверхности ISBA были сделаны модификации, описанные ниже.

1) В модель была включена схема переноса тепла, основанная на решении уравнения теплопроводности в многослойной почве [36]. Коэффициенты теплоемкости и теплопроводности брались как средневзвешенные для торфа, воды и воздуха пор торфа. Расчетная область охватывала глубину 10 м. Разрешение в верхних 2 м составляло 10 см и затем постепенно увеличивалось к нижней границе.

2) Компоненты водного баланса болота рассчитывались с помощью модели MMWH [37]. Эта модель основана на классической теории водобмена в болотных ландшафтах [38], но снабжена новым экспериментальным материалом. Модель использовалась для расчета стока и испарения с болот, которые являлись эмпирическими функциями уровня грунтовых вод. Уровень грунтовых вод был прогностической

Book_Gidromet.indb Sec1:212 13.01.2010 13:14:09

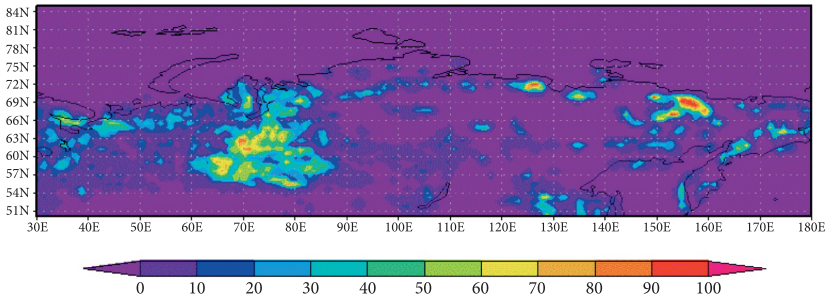


Рис. 12. Распределение болот (%) на территории России.

переменной модели и рассчитывался из уравнения водного баланса. Испарение описывалось от двух источников: транспирация растительности, зависящая в т.ч. от влажности корнеобитаемого слоя и испарение непосредственно с поверхности торфа.

3) Ряд параметров, такие как альбедо, параметр шероховатости и листовой индекс задавались специально для болот.

Был выполнен расчет серии прогнозов, включающий новую схему описания болот, для июля и августа 2008 года, для срока начальных данных 00 ч ВСВ. Параллельно проводился контрольный расчет, не включающий в себя новую параметризацию. Процент болот задавался по данным Сирина А.А. (рис. 12), пересчитанным на модельную сетку из базы данных института лесоведения РАН [39]. В результате расчетов для ячеек на территории Сибири, где процент болот составляет более 50, были получены существенно измененные потоки тепла и влаги. Поток скрытого тепла существенно увеличился, в то время как поток явного тепла уменьшился. В результате увеличения расходов тепла на испарение температура поверхности понизилась.

Ошибка прогноза температуры воздуха на уровне 2 м по территории Сибири для заболоченных территорий в модели с включением параметризации болот уменьшилась для всех заблаговременностей, за исключением 12 ч. Абсолютная ошибка была уменьшена на 1,8° для заблаговременности 6, 30 и 54 ч, на 0,8° для заблаговременности 18, 42 и 66 ч и на 1,0° для заблаговременности 24, 48 и 72 ч. Также для этих заблаговременностей уменьшилась абсолютная ошибка относительной влажности воздуха. Для заблаговременности 12, 36 и 60 ч ошибка прогнозируемой температуры стала на 1,3° хуже, что вероятно связано с ошибками в суточном ходе температуры, связанными с описанием перемешивания в приземном слое воздуха. Ведутся рабо-

Book_Gidromet.indb Sec1:213 13.01.2010 13:14:09

ты по уточнению параметризации, а также эксперименты с версией модели ПЛАВ, которая имеет 50 уровней по вертикали.

Заключение

В данной статье мы представили выполненные в период 2003—2009 гг. работы по развитию глобальной полулагранжевой модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ. Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета от 27 октября 2009 года модель ПЛАВ рекомендована в качестве основного метода прогноза полей в свободной атмосфере и давления на уровне моря. Прогнозы осадков, приземной температуры и ветра по модели ПЛАВ были рекомендованы к внедрению ранее. Версия модели ПЛАВ, предназначенная для сезонного прогноза, тем же решением рекомендована в качестве одной из компонент технологии глобальных вероятностных прогнозов, основанных на моделях ПЛАВ и T42L14, для выпуска консультативных прогнозов полей геопотенциала, давления на уровне моря, температуры воздуха на уровне 850 гПа, приземной температуры воздуха, осадков на срок до сезона.

Авторы выражают благодарность Ж.-Ф. Желену, Метео-Франс и консорциуму ALADIN/LACE за предоставленные параметризации процессов подсеточного масштаба; Р.Б. Зарипову, А.Р. Ивановой, Е.Н. Скриптуновой, Р.Ю. Фадееву, В.В. Шашкину, М.Ю. Зайченко за оказанную помощь в работе по усовершенствованию модели ПЛАВ; А.Н. Багрову, Г.К. Веселовой, Д.Б. Киктеву, Н.П. Шакиной, И.А. Розинкиной, И.А. Горлач, Е.Н. Шакотько за помощь в анализе результатов прогнозов модели; И.И. Жабиной, И.В. Маковской, А.Ю. Недачиной, Ю.А. Степанову за помощь в реализации оперативной технологии модели ПЛАВ.

Работы, представленные в настоящей статье, выполнялись при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований 07-05-00893, 06-05-08109 офи, 08-05-13570 офи-ц.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bates J.R., Li Yong, Brandt A., McCormick S.F. and Ruge J.*, A global shallow-water numerical model based on the semi-Lagrangian advection of potential vorticity // Quart. J. Roy. Met. Soc., 1995. V.121, P. 1981—2006.
2. *Tolstykh M.*, Global semi-Lagrangian atmospheric model based on compact finite-differences. In/ Proceedings of the ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conference, Paris 1996, Wiley Interscience, P. 9—14.

Book_Gidromet.indb Sec1:214 13.01.2010 13:14:10

3. *Mesinger, F. and A. Arakawa*, Numerical methods used in atmospheric models. WMO/ISCU Joint Organising Committee, GARP Publications Series No. 17, 1976, Volumes I and II, pp 64 and 499 (Русский перевод: Численные методы, используемые в атмосферных моделях, Часть 1, Л: Гидрометеоиздат, 1979, Часть 2, Л.: Гидрометеоиздат, 1982).
4. *Neta B., Williams R.T.*, Rossby wave frequencies and group velocities for finite element and finite difference approximations to the vorticity-divergence and primitive forms of the shallow water equations //Mon. Weather Rev., 1989. V. 117. P. 1439—1457.
5. *Randall D.A*, Geostrophic adjustment and the finite-difference shallow water equations // Mon. Weather Rev. 1994, V.122. P. 1371—1377.
6. *Tolstykh M.* Vorticity-divergence semi-Lagrangian shallow-water model on the sphere based on compact finite differences // J. Comput. Phys. 2002. V. 179. P. 180—200.
7. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды// Метеорология и гидрология, 2001, № 4. С. 5—16.
8. Tolstykh M.A., Gloukhov V.N. Implementation of global atmospheric models on parallel computers // Вычисл. Технологии, 2002, Т.7. Спец. вып. С. 101—109.
9. *Володин Е.М., Толстых М.А.* Параллельные вычисления в задачах моделирования климата и прогноза погоды // Вычислительные методы и программирование, 2007. Т. 8. С. 113—122.
10. *Geleyn J.-F., Bazile E., Bougeault P., Deque M., Ivanovici V., Joly A., Labbe L., Piedelievre J.-P., Piriou J.-M., Royer J.-F.* Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model // Procs. of ECMWF Seminar on Parameterization of subgrid-scale physical processes 5—9 September 1994. Reading, UK: ECMWF, 1995. P. 385—402.
11. *Bougeault P.* A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection // Mon. Weather Rev, 1985. V. 113. P. 2108—2121.
12. *Gerard L., Geleyn J.-F.* Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2005. V. 131. P. 2293—2312.
13. *Ducrocq V. and Bougeault P.* Simulation of an observed squall line with a meso-beta-scale hydrostatic model // Mon. Weather Rev, 1995. V. 123. P. 380—399.
14. *Gregory D., Kershaw R., and Inness P.M.* Parameterization of momentum transport by convection - II: Tests in single-column and general circulation models // Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1997. V. 123. P. 1153—1183.
15. *Tolstykh M.* The use of combined closure in convection parameterization scheme /Research activities in atmospheric and oceanic modeling (Ed. J. Côté) WMO/TD 1161. 2003. Rep. 33. P. 04-25, 04—26.
16. *Geleyn J.-F.* Use of a modified Richardson number for parameterizing the effect of shallow convection // J. Met. Soc. Japan. 1987. Special 1986 NWP Symposium Issue. P. 141—149.
17. *Xu K.-M., Randall D.* A Semiempirical Cloudiness Parameterization for Use in Climate Models //J. Atmos. Sci., 1996. V. 53. P. 3084—3102
18. *Ritter B. and Geleyn J.-F.* A comprehensive radiation scheme of numerical weather prediction with potential application to climate simulations //Mon. Weather Rev. 1992. V. 120. P. 303—325.
19. *Noilhan J. and Planton S.* A simple parameterization of land surface processes for meteorological models // Mon. Wea. Rev., 1989, Vol 117, P. 536—549.
20. *Giard D., Bazile E.* Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model // Mon. Wea. Rev., 2000. Vol 128, P. 997—1015
21. *Boone A., Masson V., Meyers T., Noilhan J.* The Influence of the Inclusion of Soil Freezing on Simulations by a Soil—Vegetation—Atmosphere Transfer Scheme // J. of Applied Meteorology, 2000. V. 39. P. 1544—1569.

Book_Gidromet.indb Sec1:215 13.01.2010 13:14:10

22. *Bazile E., Haiti M.El., Bogatchev A. and Spiridonov V.* Improvement of the snow parameterization in ARPEGE/ALADIN. Proceedings of SRNWP // HIRLAM Workshop on Surface Processes, Turbulence and Mountain Effects; Madrid, 22—24 October 2001. January 2002.
23. *Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R.* A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models // J. of Climate, 2003 V. 16. P. 1261—1282.
24. *Louis J.-F.* A parametric model of vertical eddy in the atmosphere // Boundary Layer Meteorology, 1979. V. 17. P. 187—202.
25. *Louis J.-F., Tiedtke M. and Geleyn J.-F.* A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF // Procs. of ECMWF Workshop on planetary boundary layer parameterization 25—27 November 1981. - Reading, UK: ECMWF, 1982. P. 59—80.
26. *Catry, B., J.F. Geleyn, F. Bouyssel, J. Cedilnik, R. Brozkova, M. Derkova, R. Mladek*: A new subgrid scale lift formulation in a mountain drag parametarisation scheme//Meteorologische Zeitschrift, 2008 V. 17, Issue 2, P. 193—208.
27. *Untch A., Hortal M.* A finite-element scheme for the vertical discretization of the semi-Lagrangian version of the ECMWF forecast model// Quart. J.Roy. Met. Soc., 2004, 130. P. 1505—1530.
28. *Staniforth, A.N., and Daley, R.W.* A finite-element formulation for the vertical discretization of sigma-coordinate primitive equation models// Mon. Weather Rev., 1977, 105. P. 1108—1118.
29. *Цырульников М.Д., Толстых М.А., Багров А.Н., Зарипов Р.Б.,* Развитие глобальной системы усвоения данных с переменным разрешением// Метеорология и гидрология, 2003, № 4, С. 5—24.
30. Navascués, B. Analysis of 2 meter Temperature and Relative Humidity. — HIRLAM Technical Report No. 28. Norrköping, January 1997.
31. IFS Documentation CY31R1. Part II: Data assimilation. http://www.ecmwf.int
32. *Богословский Н.Н., Шляева А.В., Толстых М.А.* Усвоение почвенных и приземных переменных в глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды // Вычислительные технологии, Т.13, спец. выпуск, 2008. С. 111—116.
33. *Tilmann G.* Correlation functions for atmospheric data analysis // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1999. Vol. 125. P. 2449—2464.
34. *Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В.* Воспроизведение среднесезонной атмосферной циркуляции новой версией полулагранжевой модели атмосферы // Изв. РАН, серия ФАиО, 2010, Т. № 2, в печати.
35. *Gedney N., and Cox P.M.* The Sensitivity of Global Climate Model Simulations to the Representation of Soil Moisture Heterogeneity //J. Hydrometeorology, 2003. V. 4. P. 1265—1275.
36. *Wania R., Ross I., and Prentice I.C.*, Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: 1. Evaluation and sensitivity of physical land surface processes // Global Biogeochem. Cycles, 2009. V. 23, P. GB3014
37. *Granberg G., Grip H., Ottosson-Lofvenius M., Sundh I., Svensson B.H., and Nillsson M.*(). A simple model for simulation of water content, soil frost, and soil temperatures in boreal mixed mires // Water resources research, 1999. V. 35. P. 3771—3782.
38. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах // Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 280 с.
39. *Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А.* Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН, серия географическая, 2005. Т. 5. С. 39—50.

Технологии динамико-статистических долгосрочных метеорологических прогнозов: современное состояние и перспективы

Д.Б. Киктёв
Гидрометцентр России

1. Объект прогноза

В соответствии с классификацией Всемирной метеорологической организации (ВМО) [1], «долгосрочными» называются метеорологические прогнозы на срок от 30 суток до двух лет. Прогнозы на срок свыше двух лет уже относятся к прогнозам климата. Вместо термина «долгосрочный прогноз погоды» более подходящим в данном случае является «долгосрочный метеорологический прогноз» (ДМП) [2], т.к. объектом прогнозирования на долгие сроки являются не мгновенные значения метеорологических элементов, ассоциируемые со словом «погода», и не индивидуальные структуры в атмосферных течениях, а обобщенные статистические характеристики состояния атмосферы, например, осредненные за тот или иной временной интервал значения метеорологических параметров или другие статистики от прогностических вероятностных распределений значений этих параметров.

2. Предположения, лежащие в основе ДМП

В долгосрочных процессах атмосфера выступает как часть единой системы «Атмосфера — деятельный слой подстилающей поверхности». Надежды на ДМП связаны, главным образом, с влиянием внешних воздействий на атмосферу, которые изменяются медленнее, чем текущая погода, но могут оказывать заметное влияние на статистические характеристики атмосферной циркуляции. Такого рода медленные воздействия на атмосферу могут быть обусловлены граничными условиями на ее подстилающей поверхности, к которым относятся аномалии температуры поверхности океанов (ТПО), влажности почвы, протяженности и толщины морского льда и снежного покрова.

В основе ДМП лежит оценка распределения вероятностей состояний атмосферы в период прогноза. Возможность такой оценки и,

Book_Gidromet.indb Sec1:217 13.01.2010 13:14:11

соответственно, качество ДМП зависят от относительной роли изменчивости, определяемой внешними вынуждающими воздействиями на атмосферу, в сравнении с ее собственной, «внутренней» изменчивостью, обусловленной динамической неустойчивостью атмосферных течений. Специфика ДМП по сравнению с прогнозами на более короткие сроки заключается в степени учета неадиабатических процессов и неопределенности в оценках будущего состояния атмосферы.

3. О прогностических моделях и представлении внешних воздействий на атмосферу

В течение продолжительного времени основными подходами к решению задачи долгосрочного прогноза были эмпирико-статистические методы. Историю развития долгосрочных прогнозов на основе гидродинамических методов принято отсчитывать от работы Е.Н. Блиновой [3], опубликованной в 1943 году. Успехи гидродинамического моделирования позволили перейти к активному использованию моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) в задачах ДМП и развитию динамико-статистических методов прогноза.

На интервале долгосрочного прогноза эволюцию полей, характеризующих медленные внешние воздействия на атмосферу, также необходимо прогнозировать. Технологически это может быть реализовано по-разному. Простейшим вариантом является инерционный прогноз полей аномалий ТПО — в силу высокой тепловой инерции океана начальное распределение температурных аномалий в его деятельном слое может существенным образом сказываться на эволюции атмосферных процессов в течение периода прогноза. На практике для прогноза состояния подстилающей поверхности также используются того или иного рода статистические модели. И, наконец, наиболее радикальным решением является построение совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Именно такие модели все шире используются сейчас как основной инструмент для сезонных прогнозов погоды.

Следует заметить, что на временных масштабах до сезона пока нельзя сказать, что по успешности прогнозов МОЦАО ощутимо превосходят МОЦА. Это связано с высокой сложностью совместного описания и настройки модели атмосферы и океана как единой системы. По этой причине ряд прогностических центров для описания будущих полей ТПО на интервале прогноза комбинирует данные

Book_Gidromet.indb Sec1:218 13.01.2010 13:14:11

моделей циркуляции океана с инерционными прогнозами аномалий ТПО и климатическими данными – в тропиках используются данные моделей циркуляции океана, а инерционные прогнозы и климатология ТПО подставляются в умеренных и высоких широтах. Для более детального описания таких существенных для ДМП процессов как Эль-Ниньо-Южное колебание океанские компоненты МОЦАО, как правило, имеют повышенное пространственное разрешение в экваториальных областях. Выбор подходящей конфигурации совместной модели атмосферы и океана в значительной степени зависит от требуемого периода прогноза. Так, например, в технологии среднесрочного прогноза погоды ЕЦСПП (Европейский Центр Среднесрочных Прогнозов Погоды, базируется в Великобритании) при прогнозе на срок до 10 суток океан представлен инерционным прогнозом начальных аномалий ТПО. Далее для прогнозов на большие сроки к атмосферной модели подключается динамический океанический блок. В [4] показано, что в условиях практических ресурсных ограничений при прогнозе на месяц за пределами 10 суток в МОЦАО целесообразно использовать модель верхнего перемешанного слоя океана с высоким вертикальным разрешением, а при сезонных прогнозах — модель общей циркуляции океана пусть и с меньшим разрешением в верхнем перемешанном слое, но способную воспроизводить крупномасштабную океанскую динамику, существенную в первую очередь для прогноза Эль-Ниньо-Южного колебания. Для прогнозов на временных масштабах порядка нескольких сезонов инерционный прогноз полей аномалий ТПО является уже слишком грубым приближением, что делает использование совместных моделей атмосферы и океана в этом случае практически необходимым.

Динамические блоки расчета эволюции морского льда, несмотря на важность этой характеристики, пока не включены ни в одну из МОЦАО, используемых в практике сезонных прогнозов. Так, в частности, в нынешней технологии сезонного прогноза ЕЦСПП [5] начальная концентрация морского льда сохраняется 15 суток в процессе интегрирования модели по времени с последующей релаксацией в течение очередных 15 дней до климатического распределения.

Состояние снежного покрова, температура и влажность почвы в большинстве используемых для ДМП МОЦА сегодня являются модельными переменными. Общая же тенденция развития этих моделей — совершенствование описания и расширение круга воспроизводимых физических процессов и переменных. Они все больше превращаются в модели окружающей среды. Концентрация

Book_Gidromet.indb Sec1:219 13.01.2010 13:14:11

стратосферного озона, динамика биосферных процессов, содержание атмосферных аэрозолей и целый ряд других факторов, роль которых изучена в меньшей степени, также в будущем могут войти в число механизмов, учитываемых в ДМП (хотя и не столь важных, как ТПО, влажность почты или состояние ледового покрова). Появляется опыт построения унифицированных «бесшовных технологий» (http://www.ensembles-eu.org), предназначенных как для решения прогностических задач, так и для моделирования климатических изменений.

4. Общая схема технологии ДМП

Решение задачи оценки будущего распределения вероятности состояний атмосферы по данным наблюдений о начальном состоянии можно представить в виде трех шагов:

1) инициализация прогностических моделей;

2) расчет ансамбля гидродинамических прогнозов;

3) статистическая интерпретация результатов динамических прогнозов и прикладные приложения.

4.1. Инициализация прогностических моделей

Очевидно, что для прогноза эволюции сложной системы необходимо, прежде всего, фиксировать начальное состояние этой системы в целом. Одним из важнейших условий совершенствования технологий ДМП является развитие глобальной системы наблюдений за состоянием атмосферы, океана и суши — расширение спектра усваиваемых переменных, повышение точности, пространственного и временного покрытия данными наблюдений. По сравнению с моделями ОЦА инициализация совместных моделей атмосферы и океана предъявляет дополнительные требования к наблюдательным системам. Помимо поверхностных переменных (ТПО, наряжение ветра, параметры ледового покрова и, в ряде случаев, поверхностная топография океанской поверхности) перечень усваиваемых параметров, в зависимости от конкретной реализации прогностической системы, может включать данные на глубинных горизонтах океана (по крайней мере в его верхнем деятельном слое). Наряду с температурой получает распространение усвоение данных о солености. Так как данные об океанских течениях пока отрывочны, эта информация не усваивается моделями в рутинном режиме, а используется для целей их проверки. Более низкая в сравнении с атмосферой степень

Book_Gidromet.indb Sec1:220 13.01.2010 13:14:12

информационной освещенности океана данными наблюдений создает определенные трудности при инициализации океанских моделей. Прямых измерений влажности почвы крайне мало, поэтому вместо них в основном приходится использовать различного рода косвенную информацию. Некоторые моды изменчивости климатической системы, связанные с двусторонним взаимодействием атмосферы с граничными средами, сегодня не удается инициализировать надлежащим образом.

Для повышения успешности ДМП существенным может быть уточнение ряда дополнительных «внешних» параметров. Так, например, задание реальных концентраций парниковых газов в начальный момент прогноза вместо их средних климатических значений существенно для оценки радиационного воздействия на атмосферу при расчете ретроспективных и текущих прогнозов и позитивно значимо проявляется уже на интервале сезонного прогноза [6]. Некоторые океанские модели, включаемые в прогностические МОЦАО, также учитывают прозрачность воды как характеристику, влияющую на поглощение солнечной радиации. В рамках выполняемого в настоящее время в рамках Шестой рамочной программы ЕС проекта ENSEMBLES помимо реалистичных начальных концентраций парниковых газов также задаются уточненные текущие значения концентрации вулканических аэрозолей и солнечной постоянной.

4.2. Расчет ансамбля гидродинамических прогнозов

Для учета стохастических факторов в динамике воспроизводимой системы в практике долгосрочных прогнозов широко используется метод Монте-Карло, реализуемый средствами ансамблевого гидродинамического моделирования атмосферных процессов с последующей статистической интерпретацией его результатов. Предполагается, что получаемая в результате ансамблевого моделирования статистика прогностических исходов дает информацию о наиболее вероятном состоянии системы на момент прогноза и о степени его неопределенности. Для построения представительных ансамблей необходим учет неопределенности в задании начального состояния атмосферы и несовершенства прогностических моделей. Для учета неопределенности в задании начального состояния системы расчет долгосрочных прогнозов проводится от ансамбля ее возмущенных начальных состояний. По аналогии с начальными данными возмущения могут быть внесены в параметры настройки модели и ее

Book_Gidromet.indb Sec1:221 13.01.2010 13:14:12

физических параметризаций. Практическим вариантом учета неопределенности в формулировках моделей атмосферы является также построение мультимодельных ансамблей прогностических реализаций. Как показывает мировая практика, совместные прогностические продукты обычно оказываются более успешными по сравнению с прогнозами индивидуальных моделей — участниц ансамбля. Об этом же свидетельствуют результаты нацеленных на задачи долгосрочного прогноза международных мультимодельных экспериментов: PROVOST (PRediction Of climate Variations On Seasonal to interannual Time-scales), DSP (Dynamical Seasonal Prediction), DEMETER (Development of a European Multi-model Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction), ENSEMBLES и других.

Оптимальный размер ансамбля определяется в контексте того, как используются его данные. Так, для выявления малых сдвигов в вероятностях нужны достаточно большие ансамбли. Априори можно ожидать, что, например, оценка средних, вероятностей и экстремальных статистик потребуют разного объема доступных для их оценки данных.

Требования к представительности прогностического ансамбля могут также меняться в зависимости от интенсивности внешнего воздействия на атмосферу. Правильно построенная процедура генерации ансамблей прогностических реализаций должна обеспечивать отражение существующей неопределенности в оценках начального состояния атмосферы. При слабых и умеренных внешних воздействиях на атмосферу требования к размерам прогностических ансамблей при этом могут возрастать [7].

Прогностические ансамбли бесполезны, если применяемые для их расчета модели недостаточно реалистичны. Практика показывает, что используемые сегодня для ДМП модели имеют серьезные недостатки. Всемерное улучшение прогностических моделей — ключевое направление развития методов ДМП. Оно требует активных исследований для более глубокого качественного понимания и количественной оценки целого ряда физических механизмов, ответственных за эволюцию основных мод климатической изменчивости.

4.3. Статистическая интерпретация результатов динамических прогнозов и прикладные приложения

Статистические характеристики воспроизводимой прогностическими моделями циркуляции атмосферы, вообще говоря, отличаются

Book_Gidromet.indb Sec1:222 13.01.2010 13:14:12

от соответствующих статистик реальной атмосферы, т.е. существуют систематические отличия модельного и наблюдаемого климатов. В связи с этим важную роль в ДМП играют многолетние архивы ретроспективных прогнозов. Они необходимы для проверки моделей на ретроспективном материале и для калибровки ДМП, т.е. для коррекции их систематических ошибок как в средних полях, так и в более сложных статистиках (в том числе для коррекции прогностических вероятностей).

Статистическая интерпретация гидродинамических прогнозов способна привнести в выходную продукцию ДМП «добавленную стоимость» лишь в случаях, когда базовый гидродинамический ДМП достаточно успешен. Прогнозы, не несущие в себе полезной информации, улучшить таким образом пытаться бесполезно.

Частными случаями статистической интерпретации прогнозов являются простая статистическая калибровка, заключающаяся в устранении систематических ошибок прогнозов, статистическая регионализация («даунскейлинг»), приближение MOS (Model Output Statistics) и др.

Формулировка вероятностного прогноза несет в себе априорную оценку его качества. Близость прогностических вероятностей к климатическим (все прогностические исходы приблизительно равновероятны) означает либо низкий уровень предсказуемости для данного региона, либо отсутствие явно выраженного внешнего воздействия на климатическую систему в соответствующий период.

Ведущие прогностические центры уделяют серьезное внимание развитию «дочерних» приложений на основе результатов ДМП. Так, активная работа с энергетическим и сельскохозяйственными секторами экономики осуществляется в рамках проекта стран Азиатско-Тихоокеанского бассейна по сезонному прогнозированию. На основе проекта DEMETER развивались модели прогноза урожая и модель развития малярии: для каждого члена прогностического ансамбля запускаются соответствующие дочерние модели и по результатам их интерпретации строятся вероятностные прогнозы развития урожая в Европе и заболеваемости малярией. Растет интерес к приложениям ДМП у российских энергетиков. Демонстрация положительного опыта и потенциальных возможностей приложений долгосрочных прогнозов, а также укрепление связей с потребителями являются в определенной степени катализаторами развития технологий ДМП.

Book_Gidromet.indb Sec1:223 13.01.2010 13:14:13

5. Международная инфраструктура для выпуска ДМП

Долгосрочный прогноз — сложная ресурсоемкая задача, для решения которой целесообразно объединять усилия различных прогностических центров. Совместные прогностические продукты на основе мультимодельных ансамблей долгосрочных прогнозов сегодня выпускаются на регулярной основе несколькими группами метеорологических центров. Концерн EUROSIP (European Seasonal to Interannual Prediction) комбинирует прогнозы, выпускаемые на основе совместных моделей атмосферы и океана трех центров, — ЕЦСПП, МетОфиса Великобритании и МетеоФранс. Мультимодельные прогнозы также выпускают Климатический центр стран Азиатско-Тихоокеанского региона (APCC — Asia Pacific Climate Centre, базируется в Республике Корея), Международный институт климата и общества (IRI — International Research Institute for Climate and Society, США), а также Канадский метеорологический центр. Сегодня становятся реальностью сезонные прогнозы на базе мультимодельных ансамблей общей размерностью порядка сотен прогностических реализаций. Это уже достаточно представительная статистика для составления вероятностного прогноза, включая кластерный анализ прогностических исходов.

Гидрометслужба России уже сегодня вовлечена в активное международное сотрудничество в области глобальных долгосрочных прогнозов погоды и реально выполняет целый ряд связанных с этой деятельностью международных обязательств. В России практическая деятельность в области гидродинамико-статистических долгосрочных прогнозов ведется в Гидрометцентре России и в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО). Оба института являются участниками международных проектов в области долгосрочных прогнозов: SMIP-2 (проект фокусируется на оценках предсказуемости и сравнении сезонных прогнозов различных моделей), APCC и др. Участие в таких проектах важно для поддержания исследований в области ДМП прогнозов на современном мировом уровне.

Активная деятельность по построению международной инфраструктуры для выпуска, интерпретации и распространения ДМП в настоящее время ведется в ВМО. Основные участники этой деятельности:

– центры-производители глобальных долгосрочных прогнозов (ЦПГП);

Book_Gidromet.indb Sec1:224 13.01.2010 13:14:13

– региональные климатические центры (РКЦ), осуществляющие региональную интерпретацию долгосрочной прогностической продукции различных производителей;

– национальные метеорологические центры, адаптирующие продукцию ДМП для своих нужд.

В недалеком будущем регулярный обмен продукцией долгосрочных метеорологических прогнозов между прогностическими центрами и построение совместных прогностических продуктов станут такими же обычными, каким сегодня является обмен данными среднесрочных прогнозов. Понятия «Центр — Производитель Глобальных долгосрочных Прогнозов» (ЦПГП) и «Региональный Климатический Центр» (РКЦ) уже включены в новую редакцию Технического регламента ВМО наряду с понятиями Мировой метеорологический центр (ММЦ), Региональный специализированный метеорологический центр (РСМЦ), Национальная гидрометеорологическая служба (НГМС). Глобальные сезонные гидродинамические прогнозы сегодня выпускают на регулярной основе одиннадцать ЦПГП: Вашингтон, Мельбурн, Монреаль, Москва, Пекин, Претория, Рединг, Сеул, Токио, Тулуза, Экзетер. В г. Сеул, Республика Корея, создан Ведущий центр ВМО по мультимодельным долгосрочным ансамблевым прогнозам (http://www.wmolc.org), представляющий в унифицированном виде продукцию ЦПГП авторизованным пользователям (рис. 1).

Требования к ЦПГП включают:

– фиксированный производственный цикл по выпуску глобальных долгосрочных прогнозов;

– обязательный выпуск минимального базового перечня продукции в соответствии с требованиями ВМО;

– распространение долгосрочной прогностической продукции в виде числовых сеточных полей, пространственно осредненных значений и индексов и/или изображений через Интернет и/или глобальную сеть телесвязи ВМО;

– верификация прогнозов в соответствии с требованиями Стандартизованной системы оценок долгосрочных прогнозов ВМО;

– сопровождение прогнозов актуальной информацией о методологии их выпуска — моделях, процедурах подготовки прогностических данных, а также информацией о предстоящих изменениях в прогностической технологии.

Прогнозы, выпускаемые на основе текущих данных, должны сопровождаться оценками качества ретроспективных прогнозов, рас-

Book_Gidromet.indb Sec1:225 13.01.2010 13:14:14

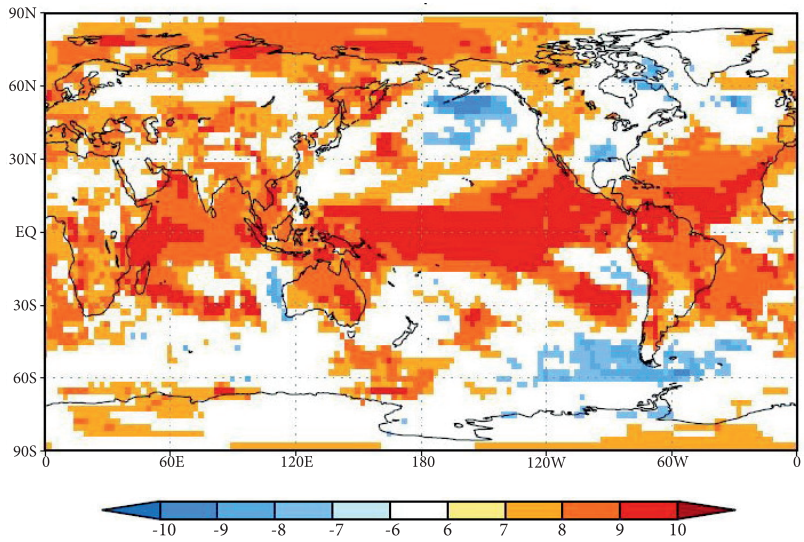


Рис. 1. Пример карты согласованности прогнозов различных ЦПГП с сайта http://www.wmolc.org для аномалий приземной температуры на период с ноября 2009 г. по январь 2010 г. Интенсивность заливки красным/синим цветом характеризует количество моделей, прогнозирующих сезонные аномалии «выше»/«ниже» нормы.

считанных по той же технологии на основе многолетнего архива исторических данных. Любые более или менее значительные изменения в моделях предполагают пересчет ретроспективных прогнозов для очередной проверки и калибровки результатов ДМП. Минимальный перечень продукции ЦПГП должен выпускаться ежемесячно в виде месячных и сезонных средних или накопленных сумм, рассчитываемых с заблаговременностью от нуля до нескольких месяцев на сетке с разрешением 2,5×2,5°.

Состав базового набора выходной продукции:

а) Калиброванная выходная продукция систем ансамблевого прогнозирования, показывающая среднее и разброс распределения для:

– температуры на уровне 2 м;

– температуры поверхности океана;

– осадков;

– H500, давления на уровне моря, T850.

Прогностические поля представляются в виде отклонений от модельного климата, оцениваемого по данным ретроспективных про-

Book_Gidromet.indb Sec1:226 13.01.2010 13:14:14

Book_Gidromet.indb Sec1.227

Таблица 1

Характеристики технологий ДМП различных ЦПГП

Прогностический центр	Модель	Характеристики прогностического ансамбля	Примечание
ECMWF	МОЦАО (System 3) Атмосфера: пространственное разрешение TL159L62 (1,125° ~110 км, до 5 гПа). Океан: пространственное разрешение 1×1° в средних и высоких широтах с повышением до 0,3° в экваториальных областях. 29 уровней по вертикали.	41 реализация: атмосфера – сингулярные вектора, 5 параллельных циклов океанского анализа, различающихся мерами задания неопределенности в поле ветра у подстилающей поверхности. Неопределенность в значениях ТПО представлена 40 возмущенными полями ТПО. Дополнительно в течение периода прогноза используется стохастическая физика. Это увеличивает разброс между членами ансамбля в первые дни прогноза, компенсируя отсутствие начальных возмущений для атмосферы. Продолжительность прогноза — 7 месяцев	Сайт: http://ecmwf.int. В свободном доступе на сайте представлен минимальный объем информации. Долгосрочные прогнозы в него не входят. Доступ к дополнительной продукции возможен лишь в режиме авторизованного доступа. Расширенный объем продукции доступен для стран-членов консорциума ECMWF и на коммерческой основе.
Met Office, UK	МОЦАО GloSea (на основе HadCM3) Атмосфера: 2,5×3,75°, 19 уровней Океан: 40 уровней.	Размер ансамбля — 41. Генерация возмущений — только для океанской компоненты МОЦАО через возмущения полей ветрового напряжения и дополнительные возмущения полей ТПО. Ежемесячно выпускается прогноз на 6 месяцев.	http://www.metoffice.co.uk/ Сезонные прогнозы: http://www.metoffice.gov.uk/weather/world/seasonal/index.html

13.01.2010 13:14:14

Прогностический центр	Модель	Характеристики прогностического ансамбля	Примечание
National Centers for Environmental Prediction (NCEP), США	МОЦАО Climate Forecast System (CFS)	10-месячные прогнозы рассчитываются дважды в день. Описание технологии: Saha S. and Coauthors. The NCEP Climate Forecast System // Journal of Climate, 2006, Vol. 19, No. 15. P. 3483—3517.	Продукция глобальных ДМП в графическом виде доступна по адресу http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/ensoforecast.shtml (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/wwang/cfs_fcst4CPC/)
Japan Meteorological Agency, Япония	МОЦАО Прогноз на месяц (34 дня) – раз в неделю: TL159L60 с инерционным прогнозом аномалий ТПО Сезонный прогноз — раз в месяц. Атмосфера: TL95 L40 (1,875° ~180 км) Океан: пространственное разрешение 1×1° с повышением до 0б3° в экваториальных областях. 50 уровней по вертикали.	Прогноз на месяц: 50 членов (25 членов × 2 суток) — сочетание BGM[1] и LAF[2] Сезонный прогноз: 51 член ансамбля – сингулярные вектора + дополнительные возмущения полей ТПО. Динамический прогноз аномалий ТПО комбинируется с инерционным и климатическим прогнозами ТПО.	http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/index.html
Гидрометцентр России	МОЦА 1,125×1,40625° L28 Океан: инерционный прогноз аномалий ТПО.	Ансамбль — 10 прогностических реализаций. Способ генерации ансамбля — BGM для атмосферных данных. Периодичность выпуска – ежемесячно. Прогноз выпускается на 4 месяца (сезон с месячной заблаговременностью).	В графическом виде сезонные прогнозы и оценки их успешности доступны по адресу http://wmc.meteoinfo.ru/season

Book_Gidromet.indb Sec1:228
13.01.2010 13:14:15

гнозов за период не менее, по крайней мере, 15 лет. Для атмосферных моделей также должны быть предоставлены поля ТПО, используемые в качестве граничных условий.

б) Калиброванные вероятности осуществления прогностических категорий для:

– температуры на уровне 2 м;
– температуры поверхности океана (для МОЦАО);
– осадков.

В соответствии с нынешними возможностями в качестве прогностических категорий следует использовать терцили (3 формально вероятных прогностических категории) и сопровождать прогноз информацией о границах категорий. В перспективе, по мере роста технологических возможностей, сможет быть обеспечено большее число категорий.

В таблице 1 приведена краткая информация о ряде прогностических технологий глобальных ДМП различных ЦПГП, в том числе Гидрометцентра России. В 2009 году Гидрометцентру России стали доступны ресурсы нового суперкомпьютерного вычислительного комплекса. В ближайшие месяцы предполагается существенно обновить используемую для сезонных прогнозов модель атмосферы [8] и увеличить размер выпускаемых прогностических ансамблей. Ведется работа по созданию совместной модели атмосферы и океана.

В части региональных долгосрочных прогнозов следует отметить, что в системе Росгидромета сформирован и впоследствии утвержден Межгосударственным советом по гидрометеорологии стран СНГ Северо-ЕврАзийский Климатический Центр (СЕАКЦ) — см. http://seakc.meteoinfo.ru. На сайте СЕАКЦ для авторизованных НГМС европейского и азиатского регионов сегодня представлены долгосрочные прогнозы Гидрометцентра России и ГГО, а также их совместные вероятностные сезонные прогнозы (рис. 2). В недалеком будущем для построения совместных прогностических продуктов СЕАКЦ предполагается также использовать данные ряда зарубежных провайдеров ДМП. В европейской и азиатской региональных ассоциациях ВМО СЕАКЦ позиционируется как РКЦ ВМО, однако для формального подтверждения этого статуса СЕАКЦ должен продемонстрировать способность обеспечивать страны региона климатической информацией в ходе испытательного периода (пилотного эксперимента). В европейском регионе такой пилотный эксперимент был начат летом 2009 года. В азиатском регионе аналогичный испытательный эксперимент будет инициирован в ближайшее время.

Book_Gidromet.indb Sec1:229 13.01.2010 13:14:15

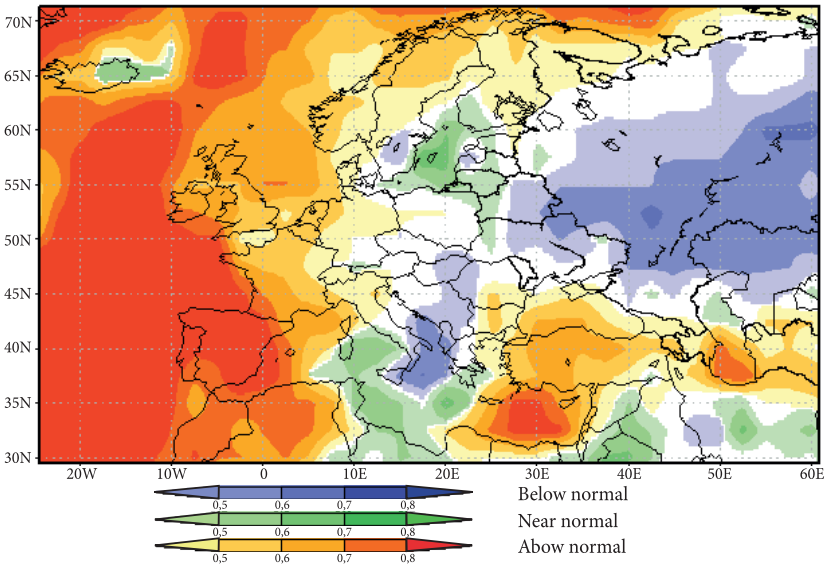


Рис. 2. Композитная карта вероятностей с сайта Северо-Евразийского климатического центра, построенная по данным сезонных прогнозов Гидрометцентра России и ГГО для приземной температуры. Цветом показаны вероятности наиболее вероятных градаций аномалий (ниже/около/выше нормы). Вероятности трех градаций для моделей Гидрометцентра России и ГГО взяты с равными весами. Период прогноза: ноябрь 2009 — январь 2010 гг.

6. Современный уровень успешности ДМП

Развитие моделей атмосферной циркуляции невозможно без их разносторонней проверки (валидации). Проверка на основе текущих оперативных данных требует значительного времени для накопления представительного статистического материала, позволяющего делать заключения об особенностях поведения и адекватности моделей. Появление общедоступных многолетних архивов данных реанализа дало возможность проводить систематическую проверку различных моделей на едином историческом материале, сравнивать их результаты, проводить диагностические исследования. В последние годы был инициирован целый ряд международных проектов по сравнению и диагнозу результатов различных моделей, фокусирующихся на определенных аспектах моделирования гидрометеорологических процессов.

Book_Gidromet.indb Sec1:230 13.01.2010 13:14:16

Эксперименты по расчету многолетних серий ретроспективных сезонных прогнозов по протоколу SMIP-2 (Seasonal Prediction Model Intercomparison Project, см. http://www-pcmdi.llnl.gov) для оценки долгосрочной предсказуемости и сравнения различных прогностических моделей проведены практически всеми центрами, выпускающими глобальные ДМП. Оценки успешности прогнозов различных ЦПГП, включая Гидрометцентр России, можно найти на специализированном сайте ВМО по верификации долгосрочных прогнозов — http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/ (на сайте представлены оценки успешности гидродинамических прогнозов после простой калибровки, заключающейся в безусловном устранении систематических ошибок). Текущие вероятностные сезонные прогнозы Гидрометцентра России с месячной заблаговременностью и оценки успешности ретроспективных прогнозов [9] доступны по адресу http://wmc.meteoinfo.ru/season. Более разносторонний эксперимент по валидации ДМП, CHFP (Climate-system Historical Forecast Project) был недавно инициирован в рамках Всемирной программы климатических исследований [10].

В 2007—2008 гг. были проведены совместные оперативные испытания технологий глобальных ДМП Гидрометцентра России и ГГО на период до сезона. Для территории России совместные вероятностные прогнозы Гидрометцентра России и ГГО показали заметно лучшие результаты, чем каждая из двух моделей по отдельности. По итогам испытаний метод прогноза был рекомендован для внедрения в оперативную практику.

В целом, оценки свидетельствуют о наличии значимой успешности сезонных прогнозов крупномасштабной циркуляции в тропиках, где основная доля крупномасштабной изменчивости атмосферы определяется влиянием медленно меняющихся граничных условий. В умеренных широтах и, в частности, на значительной части территории России для рассматриваемых временных масштабов успешность сезонных прогнозов остается весьма скромной и недостаточной для многих практических приложений (рис. 3). Эти закономерности весьма характерны для других прогностических моделей, используемых на сегодняшний день для задач ДМП. Тем не менее, на общем фоне весьма скромной успешности сезонных прогнозов имеются регионы, периоды и метеорологические параметры, для которых есть надежда на получение практически полезного прогностического сигнала (так, например, успешность ДМП для температуры, как правило, заметно выше, чем для полей осадков). Кроме того, сезонные прогнозы явля-

Book_Gidromet.indb Sec1:231 13.01.2010 13:14:16

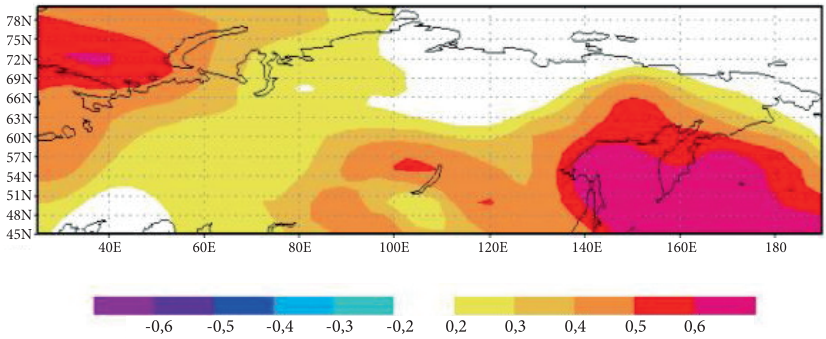


Рис. 3. Коэффициент временной корреляции фактических и средних прогностических аномалий для ретроспективных прогнозов температуры на уровне 850 гПа за 1981—2001 гг. по данным мультимодельного ансамбля APCC. Период прогноза: сезон (декабрь, январь, февраль), заблаговременность прогноза — 1 месяц.

ются естественным полигоном для испытания и совершенствования гидродинамических моделей и для улучшения качества прогнозов на более короткие сроки (в частности для прогнозов на месяц), где получение практически значимых результатов уже сегодня вполне реально.

Средние за многолетний период оценки дают лишь самое общее представление об уровне успешности сезонных прогнозов, который меняется от случая к случаю и зависит от многих факторов: от того, какие атмосферные характеристики прогнозируются; от региона, сезона; от начальной структуры гидрометеорологических полей; от внешних вынуждающих условий; от несовершенства модели и неточности задания начального состояния. Разброс относительно этих средних оценок и закономерности изменения успешности прогнозов представляют практический интерес и требуют дальнейших исследований.

Очевидно, что возможности повышения предсказуемости на сезонных временных масштабах реализованы неполностью. В сегодняшних технологиях ДМП слабо задействованы многие потенциально важные резервы предсказуемости (например, более адекватное описание взаимодействия стратосферы с тропосферой, атмосферы с поверхностью суши, криосферой и т.д.). Источники сезонной предсказуемости в настоящее время являются предметом исследований в рамках различных международных диагностических про-

Book_Gidromet.indb Sec1:232 13.01.2010 13:14:16

ектов: GLACE (Global Land-Atmosphere Coupling Experiment) – для влажности почвы, SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) — для взаимодействия стратосферы с тропосферой, CliC (Climate and Cryosphere) — для морского льда и криосферы и т.д. Для прогресса в ДМП важен опыт и прогностического и климатического сообществ, так как задача ДМП лежит на стыке областей их интереса.

7. Меры по развитию технологий выпуска ДМП

Какие меры представляются необходимыми в нынешних условиях для развития отечественных технологий ДМП:

– развитие физического наполнения прогностических моделей, используемых для задач ДМП;

– исследование предсказуемости гидрометеорологических процессов и механизмов ее изменения;

– развитие систем усвоения данных о состоянии окружающей среды (атмосферы, океана, почвы, криосферы);

– развитие совместной модели атмосферы и океана;

– развитие систем интерпретации результатов динамических ДМП;

– развитие вычислительной базы для исследовательских и оперативных задач ДМП;

– активное участие в международной научной и оперативно-прогностической кооперации в области ДМП;

– поддержание адекватного сложности задачи уровня кадровых ресурсов.

Настоящий обзор подготовлен при проддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-00630-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Наставление по системам глобальной обработки данных и прогнозирования (WMO-No. 485), 2003 г., том I
2. *Филатов А.Н., Муравьев А.В., Реснянский Ю.Д.* Долгосрочный метеорологический прогноз: математические проблемы и возможности гидродинамических моделей // кн. 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. С. 141—165.
3. *Блинова Е.Н.* Гидродинамическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы // Доклады АН СССР. 1943, т. 39, № 7. С. 284—287.
4. *Vitart F.*, 2008: Coupling issues in monthly forecasting, - ECMWF Workshop on Ocean-Atmosphere Interactions, 10—12 November 2008 (http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/_pdf/workshop/2008/Atmos_Ocean_Interaction/Vitart.pdf)

Book_Gidromet.indb Sec1:233 13.01.2010 13:14:17

5. *Anderson D. L. T., Stockdale T., Balmaseda M., Ferranti L., Vitart F., Molteni F., Doblas-Reyes F., Mogensen K. and Vidard A.*, Seasonal Forecast System 3 // ECMWF Newslette, 2007. P. 110 (http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/110_rev.pdf).
6. *Doblas-Reyes F.J., Hagedorn R., Palmer T.N. and Morcrette J.-J.* Impact of increasing greenhouse gas concentrations in seasonal ensemble forecasts // Geophysical Research Letters, 2006, Vol. 33, L07708, doi 10.1029/2005GL025061
7. *Straus D.M., F. Molteni,* 2004: Flow regimes, SST forcing, and climate noise: results from large GCM ensembles, J. Climate, 17, 1641—1656.
8. *Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В.* 2010: Воспроизведение атмосферной циркуляции на сезонных масштабах новой версией полулагранжевой модели атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, № 2, в печати.
9. *Киктев Д.Б., Тросников И.В., Толстых М.А., Зарипов Р.Б.* Оценки успешности прогнозов сезонных аномалий метеорологических полей для модели SL-AV в эксперименте SMIP-2. // Метеорология и гидрология, 2006, № 6. С. 16—26.
10. WCRP Position Paper on Seasonal Prediction Report from the First WCRP Seasonal Prediction Workshop, 4—7 June 2007, Barcelona, Spain http://wcrp.wmo.int/documents/WCRP_SeasonalPrediction_PositionPaper_Feb2008.pdf
11. *Toth, Z., and Kalnay E.* Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. // Mon. Wea. Rev., 1997, 127, P. 3297—3318[1].
12. *Hoffmann, R.N. and E. Kalnay*, Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. Tellus, 1983, 35A. P. 100—118[2].

[1] Метод выращивания начальных возмущений для построения ансамбля: BGM — Breeding of Growing Modes [11].

[2] Метод построения ансамбля по данным прогнозов за несколько последних сроков наблюдений: LAF — Lagged Average Forecasting [12].

Прогнозы погоды на месяц: состояние и перспективы

В.М. Хан, Р.М. Вильфанд, В.П. Садоков, В.А. Тищенко
Гидрометцентр России

Введение

Проблема повышения эффективности прогнозов погоды на месяц признана актуальной во всем мире, однако активную исследовательскую деятельность в этом направлении осуществляют только крупные мировые метеорологические центры. В Гидрометцентре России история составления и выпуска оперативных прогнозов погоды на месяц для обеспечения нужд широкого спектра отраслей народного хозяйства насчитывает более 60 лет.

Труды Е.Н. Блиновой положили начало разработке методов гидродинамического прогнозирования средней месячной температуры и циркуляции воздуха на среднем уровне тропосферы. Б.П. Мультановский, С.Т. Пагава и их последователи предложили новые подходы к макросиноптическому анализу атмосферной циркуляции. Г.Я. Вангенгейм и А.А. Гирс разработали макроциркуляционный метод долгосрочных прогнозов погоды. Предложенная ими классификация атмосферных процессов учитывала характер преобладающих тропосферных переносов в крупных регионах. Основоположниками синоптико-статистического направления в области долгосрочного прогнозирования являются Н.А. Багров, Д.А. Педь, Г.В. Груза. Последователям их школы — О.В. Батыревой, Л.Е. Лукияновой, Н.Н. Мякишевой и другим — принадлежат многочисленные результаты, основанные на обобщении представлений о региональных атмосферных процессах. Известные исследования М.И. Юдина, А.В. Мещерской и других по развитию физико-статистических методов различались исходными гипотезами о закономерностях атмосферной циркуляции, характером учета предыстории и способами выбора и использования «предвестников».

В настоящее время, следуя передовым тенденциям, Гидрометцентр России прилагает усилия к реализации современных подходов в схемах прогноза погоды на месяц. Передаваемая пользователям прогностическая информация является продуктом, полученным в результате оптимальной комплексации гидродинамических прогнозов, статистических и синоптических прогнозов.

Book_Gidromet.indb Sec1:235 13.01.2010 13:14:17

Эмпирические (физико-статистические и синоптические) методы прогнозирования на месяц

Прежде чем перейти к рассмотрению современных физико-статистических методов, надо напомнить, что остаются все еще актуальными прогнозы, составляемые синоптическим методом Мультановского. В технологии составления долгосрочных прогнозов погоды (ДПП) методу Мультановского отведена роль *предварительного прогноза*, который дается примерно за месяц до прогнозируемого месяца. Технология составления этого прогноза включает в себя трехэтапный анализ ожидаемого развития макропроцессов над исследуемым регионом. На первом этапе синоптиками анализируются наиболее яркие крупномасштабные процессы в предшествующем трехмесячном периоде, далее изучаются ритмические процессы в атмосфере и фазы развития макропроцессов. На заключительном этапе по результатам предшествующих анализов выбирается оптимальный год-аналог. При его выборе принимается во внимание *оперативный прогноз,* составленный на месяц, предшествующий тому, на который дается прогноз синоптическим методом. Результаты оценок предварительных прогнозов демонстрируют достаточно высокие показатели оправдываемости, что является демонстрацией высокого профессионального уровня и опыта синоптиков-долгосрочников отдела долгосрочных прогнозов погоды (ОДПП): Т.А. Богдановой, В.И. Захаренковой, В.И. Ивановой, Н.А. Русиной, Н.В. Сатиной, Г.И. Чекмасовой.

Другая методика составления прогнозов основных метеоэлементов на месяц основывается на физико-статистическом подходе, разработанном В.П. Садоковым и Д.А. Педем. Результаты численных прогнозов на декаду [3] и ряд разнообразных статистических факторов, характеризующих состояние атмосферы, составляют основу этой многопараметрической модели [8]. Этот метод в течение многих лет давал неплохие результаты, сравнимые с последними достижениями прогнозов на месяц по численным моделям с учетом постпроцессинговой коррекции.

Благодаря значительному прогрессу в области гидродинамического моделирования в последние годы месячные прогнозы, просчитанные по спектральным гидродинамическим моделям Гидрометцентра России и Главной Геофизической Обсерватории [11, 12] также стали учитываться при составлении окончательного официального прогноза.

Book_Gidromet.indb Sec1:236 13.01.2010 13:14:18

Таким образом, окончательный официальный оперативный прогноз погоды на месяц, который представляется в месячном бюллетене погоды, является результатом комплексного анализа всех видов перечисленной выше прогностической продукции. Более трех лет данная методика успешно используется в качестве основной под руководством Р.М. Вильфанда. В качестве примера в таблице 1 приводятся средние показатели успешности оперативных прогнозов температуры воздуха по территории России за последние три года, где Ro — показатель оправдываемости по знаку аномалий, ACCs — пространственный коэффициент корреляции между прогностическими и фактическими значениями аномалий температуры воздуха, RMSE — среднеквадратичная ошибка прогнозов.

Таблица 1

Ro		
2006 г.	**2007 г.**	**2008 г.**
0,37	0,66	0,52
ACCs		
0,32	0,21	0,19
RMSE		
1,1	1,4	1,1

Помимо прогноза с нулевой заблаговременностью, важной задачей оперативной деятельности ОДПП Гидрометцентра России является долгосрочный прогноз по месяцам на вегетационный и отопительный периоды года, составляемый Л.В. Нагрешниковой. Прогноз строится на применении метода статистической комплексации [2], в котором составляющими являются прогнозы на полугодие по месяцам, разработанные в Гидрометцентре России, Главной Геофизической Обсерватории, научно-исследовательском институте Арктики и Антарктики и в Дальневосточном региональном научно-исследовательском институте. Основой методики прогноза Гидрометцентра России является метод временных аналогов. Для каждой станции осуществляется подбор случаев, в которых ход знака аномалии температуры аналогичен ходу аномалий температуры в исходные три месяца. Из множества таких случаев определяются наиболее вероятные частоты в будущем. По пространственным аналогам к полям аномалий температуры находят вероятные поля месячных сумм осадков.

Book_Gidromet.indb Sec1:237 13.01.2010 13:14:18

Помимо этих прогнозов, строятся карты условий засушливости, а также зимних условий погоды, как для прогнозов с нулевой заблаговременностью, так и для прогнозов на вегетационный и отопительный периоды года.

В последние годы метод, основанный на временных аналогах, получил дальнейшее развитие. Главным новшеством стало то, что при определении аналогичных случаев стали использоваться не среднемесячные значения аномалий температуры (АТ), а ежедневные аномалии за последние три месяца, и оценивалась реальная близость (евклидово расстояние) хода АТ в истории с ходом АТ за последние три месяца. Кроме того, появилась возможность прогнозировать сглаженный ход АТ в течение будущего сезона и строить будущие карты АТ за различные периоды времени (пентады, декады и т.п.), а также карты будущих осадков. Первый вариант этой физико-статистической модели был внедрен в качестве вспомогательного при прогнозе на месяц с месячной заблаговременностью (аналог синоптического предварительного прогноза). Более совершенный вариант этой модели, дающий неплохие результаты при прогнозе среднемесячных АТ на будущий сезон по месяцам, сейчас проходит испытание.

Вышеописанная методика дает много возможностей для модификаций и дальнейшего совершенствования, и мы видим ближайшую перспективу в развитии данной технологии прогноза на месяц и сезон.

Наиболее трудной проблемой в ДПП остается прогноз месячных сумм осадков. Существующие подходы к решению этой проблемы пока не дали желаемых результатов: оправдываемость таких прогнозов не превышает 60—70%.

Большую роль в технологической цепочке процедур при составлении ДПП играет подготовка фактической информации и поддержание соответствующих баз данных. Эта работа требует постоянного внимания. С появлением массивов различных реанализов стало возможным автоматизировать мониторинг, анализ и блоки прогнозирования метеоэлементов на базе аналого-статистических подходов. Проекты реанализа впервые стали реализовываться в первой половине 90-х годов в крупнейших мировых центрах прогноза погоды, и в настоящее время насчитывается более 10 центров, выпускающих собственную продукцию. Наиболее популярными и доступными являются реанализы NCEP/NCAR, NCEP/DOE, ERA-40, JRA-25. Основу построения реанализов составляет четырехмерное усвоение всех доступных метеорологических наблюдений. Выходные продукты реанализа, представляющие собой глобальные сеточные

Book_Gidromet.indb Sec1:238 13.01.2010 13:14:19

поля различных характеристик атмосферы с хорошим временным и пространственным разрешением, использовались в многочисленных работах и значительно способствовали прогрессу в анализе и прогнозировании погоды и климата.

С использованием данных реанализов в ОДПП в последние годы велась работа по реализации автоматизированной схемы прогноза хода температуры в течение месяца и сезона на основе аналого-регрессионного подхода. Прогностическая схема внутримесячного хода температуры [6] представляет собой кусочно-линейную регрессионную модель, предикторами в которой являются ортогонализированные ансамблевые декадные прогностические поля геопотенциала H_{500}, давления на уровне моря p_0 и температуры на поверхности 850 гПа T_{850}, являющиеся выходной продукцией гидродинамических моделей.

К каждой новой реализации первого предиктора (средней декадной величине или трем коэффициентам при главных компонентах H_{500}) подбирается группа аналогов, составляющая около 50% исходной выборки. Мерой аналогичности служат евклидовы расстояния между исходным и всеми остальными векторами-предикторами. Остальные предикторы выстраиваются в порядке возрастания евклидова расстояния между исключенным и архивным предикторами. Затем отбирается группа аналогов ко второму и третьему предикторам среди уже отобранных. Далее на аналоговой выборке решается уравнение множественной линейной регрессии. По полученным коэффициентам регрессии рассчитываются значения предиктанта (коэффициентов разложения по естественным ортогональным составляющим). Временной ход температуры восстанавливается по коэффициентам разложения.

Были проведены эксперименты по использованию ансамблевых гидродинамических прогнозов в качестве предикторов в предложенной схеме. Сравнивались статистические прогнозы хода температуры в течение месяца, использующие ансамбли гидродинамических прогнозов, составленных в Гидрометцентре России и NCEP (США). Для восстановления сглаженного хода температуры в течение месяца в прогностической схеме применялись как отдельные гидродинамические прогнозы, так и их осреднения по ансамблю.

Результаты испытаний метода продемонстрировали, что систематические ошибки прогнозов в большинстве случаев имели отрицательные значения, в диапазоне от –0,9 до –3,0°С. Средние абсолютные ошибки прогнозов среднесуточной температуры находились

Book_Gidromet.indb Sec1:239 13.01.2010 13:14:19

в пределах от 2,5 до 5,0°С. Относительные ошибки в среднем за год принимали значения от 0,6 до 3,0°С, а в большинстве случаев были близки к 1°С. Оценка знака прогностической аномалии температуры (ρ) имела средние значения от 0 до 0,8. Коэффициенты корреляции между среднесуточными значениями прогностической и фактической температуры изменялись в среднем от –0,1 до 0,6. Отмечено довольно высокое качество прогноза для второй декады месяца. Сравнение успешности прогнозов хода среднесуточной температуры воздуха в холодный и теплый сезоны года показало, что в теплый период года метод обеспечивает более высокую успешность прогнозов, что объясняется меньшей по сравнению с холодным периодом изменчивостью температуры воздуха.

По результатам испытаний, Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим прогнозам Росгидромета [5] одобрила данный метод прогноза и рекомендовала его к внедрению в оперативную практику.

В ходе выполнения нескольких проектов РФФИ проводились работы по усовершенствованию схемы прогноза сглаженного хода температуры в течение месяца [4, 7]. Для выявления причин нестационарности успешности прогнозов и поиска закономерностей временной и пространственной изменчивости характеристик, влияющих на прогнозируемые элементы погоды, использовались два подхода. С одной стороны, изучались корреляционные зависимости предиктанта и предикторов (парные и множественные корреляции) по времени и по пространству в информативных районах. Последние в большинстве случаев близки к районам климатических экстремумов (центрам действия атмосферы и др.). С другой стороны, проводился анализ типов объективной классификации метеополей в первой декаде прогностического месяца. Автоматическая классификация средних декадных полей H_{500} для территории первого естественно-синоптического района (ЕСР) в каждой декаде года осуществлялась по методике [1]. Объекты классификации — среднедекадные поля H_{500}, предварительно разложенные по естественным ортогональным составляющим. Критерием сходства объектов служила евклидова метрика. Для определения оптимального числа классов использовался критерий качества классификации, который представляет собой отношение средней внутриклассовой дисперсии к общей дисперсии всей обучающей выборки. В результате вычислительных экспериментов выбиралось оптимальное число классов метеорологических полей (в большинстве случаев 12 классов).

Book_Gidromet.indb Sec1:240 13.01.2010 13:14:19

Обнаружено, что если циркуляция в средней тропосфере соответствует одному из выявленных таким образом классов, то априорная вероятность неудачного прогноза составляет 50—80%, при других типах циркуляции — лишь 10—40%.

Показано, что долгосрочные прогнозы имеют самые высокие показатели качества в случае блокирующих ситуаций в северной части Атлантики, когда атмосферная ситуация стабильна и развивается во времени относительно медленно.

Результаты проведенных исследований указывают на то, что для возможности априорной оценки качества прогноза и повышения качества прогнозов имеет смысл использовать классификацию метеорологических полей в средней тропосфере. Анализ результатов на независимом материале показал, что выявленные классы полей, при которых повторяемость несогласованных прогнозов максимальна, соответствуют классам на обучающей выборке.

Гидродинамические прогнозы. Статистическая интерпретация гидродинамических прогнозов

Возможности использования гидродинамических моделей (ГДМ) для прогнозирования метеоэлементов на большой срок (месяц и более) активно исследовались в последние десятилетия. Эта задача оказалась трудной по многим причинам. Главной из них является существование пределов теоретической и практической предсказуемости атмосферных процессов. Лоренцом было показано, что решения ГДМ, существенно зависящие от начальных данных, имеют предел предсказуемости около 2 недель (так называемая предсказуемость первого рода). За пределом этого срока решения становятся зависимыми от внешних факторов и граничных условий (так называемая предсказуемость второго рода). Важную роль при этом играют параметризации, используемые в моделях для описания физических процессов. Решения ГДМ на большой срок не обладают свойством однозначности и сильно зависят от различных факторов, что приводит к разбросу траекторий решения даже при незначительных изменениях этих факторов. Это обстоятельство привело к необходимости развития ансамблевых методов решения ГДМ.

На современном этапе решения ГДМ на сроки до двух недель имеют неплохую оправдываемость и широко используются в оперативной практике, как непосредственно, так и в процедурах постпроцессинга.

Book_Gidromet.indb Sec1:241 13.01.2010 13:14:20

На сегодняшний день, в Гидрометцентре России действуют две глобальные ГДМ, выпускающие, кроме всего, и месячные прогнозы погоды: 1) конечно-разностная полулагранжева модель общей циркуляции атмосферы (ПЛАВ), развитая совместно Гидрометцентром России и Институтом вычислительной математики РАН; 2) спектральная модель Т41L15. Расчет глобальных прогнозов на долгие сроки по упомянутым моделям в ансамблевом виде стал возможным с внедрением в рамках проекта модернизации Росгидромета нового вычислительного комплекса (кластера SGI Altex 4700 с производительностью 11 TFlops и кластера SGI ICE 8200 на 16 TFlops).

Несмотря на постоянные усилия по усовершенствованию гидродинамического прогнозирования на долгие сроки, в процессе интегрирования совместных гидродинамических моделей возникают систематические ошибки, которые неизбежно снижают уровень оправдываемости прогнозов. Это связано, во-первых, с тем, что качество и разрешение по пространству и времени наблюдательной гидрометеорологической сети, необходимой для задания начальных условий для моделей, остается не вполне удовлетворительным. Во-вторых, недостаточная изученность некоторых физических процессов, происходящих в климатической системе, заставляет описывать их в моделях в упрощенной форме. Кроме того, в связи с ограничениями вычислительных ресурсов, прогностические поля при долгосрочном прогнозировании имеют недостаточное разрешение. Статистическая постпроцессинговая процедура — один из способов повышения предсказуемости прогнозов, она позволяет провести необходимую корректировку гидродинамических прогнозов к конкретному региону с учетом его физико-географических особенностей.

Основные направления исследований по совершенствованию методик прогнозирования на сроки от месяца и более с использованием статистического постпроцессингового анализа в Гидрометцентре России реализуются в рамках федеральных целевых и ведомственных программ в интересах Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, в ходе выполнения работ по грантам Российского фонда фундаментальных исследований, а также плана деятельности, созданного в 2007 г. Росгидрометом Северо-Евразийского регионального климатического центра.

Так, при объединении усилий сотрудников Гидрометцентра России А.Ю. Бундель, Д.Б. Киктева, В.Н. Крыжова В.А. Оганесяна, В.П. Садокова, А.С. Садокова, В.А. Тищенко, В.М. Хан и ученых из Института глобального климата Г.В. Грузы, Э.Я. Раньковой, под руководством

Book_Gidromet.indb Sec1:242 13.01.2010 13:14:20

Р.М. Вильфанда, успешно разрабатываются научные основы методов вероятностного и детерминистского прогнозов элементов погоды на сроки от месяца до сезона на основе ансамблей двух отечественных гидродинамических моделей (Гидрометцентра России и ГГО) и 6 зарубежных моделей, задействованных в работе Климатического центра Азиатско-Тихоокеанского сотрудничества. Возможность такого подхода опирается на концепцию существования предсказуемости второго рода по Лоренцу, постулирующую возможность успешного прогнозирования статистического режима процессов в атмосфере. Для реализации основной поставленной задачи оценивалась успешность воспроизведения моделями вероятностных и статистических характеристик макропогоды, разрабатывалась система характеристик, описывающих макросиноптические процессы, проводились эксперименты с оптимальной комплексацией группы гидродинамических и эмпирических прогнозов с целью создания усовершенствованного прогноза погоды на пролонгированные сроки от месяца и более. Показано, что, в целом, оценки качества прогнозов, скомплексированных с использованием равновесной весовой функции все же выше оценок индивидуальных прогнозов. Однако, уровень оправдываемости прогнозов во внетропических регионах остается скромным. Как правило, успешность прогнозов в тропиках выше, чем в средних и высоких широтах.

Еще одним шагом к улучшению понимания макропроцессов формирования региональных долгоживущих термобарических аномалий, определяющих погодные условия на месяц, стало проведение комплекса исследований о стационировании антициклонов в Атлантико-Европейском секторе. Особенностью подхода к изучению таких процессов явилось объединение богатого эмпирического опыта синоптиков, с одной стороны, и возможностей современных вычислительных ресурсов и систем усвоения, с другой. Синоптики детально проанализировали синоптические и сборно-кинематические карты и выявили на архивном материале случаи возникновения процессов стационирования и блокирования антициклонов (АЦ). Вычислительные средства позволили применить независимый подход по идентификации случаев возникновения аномальных макропроцессов. Определены районы с повышенной повторяемостью нахождения центров блокирующих ситуаций. Блокирующие ситуации оказалось возможным объединить в три скопления — вблизи Британии, в центральной части Европы и в районе Урала. Был сделан вывод о возможности использования информации о блокирующих

Book_Gidromet.indb Sec1:243 13.01.2010 13:14:20

антициклонах в схемах долгосрочного прогнозирования термического режима. При определенной локализации максимумов геопотенциала и определенных направлении и интенсивности переноса, на периферии АЦ происходят довольно устойчивые крупномасштабные процессы, которые формируют долгопериодные аномалии и обусловливают смену термического режима на большой территории. Были проведены тестовые эксперименты с численной моделью ПЛАВ на успешность воспроизведения динамических характеристик аномальных процессов синоптического масштаба, являющихся предвестниками формирования длительных аномальных погодных условий. Результаты показали, что при использовании во входных данных условия наличия над территорией 1-го ЕСР интенсивных и продолжительных (более 10 суток) блокирующих антициклонов, качество долгосрочных прогнозов на основе ГДМ заметно повышается в период блокирования и в последующие 10—20 суток.

Заключение

Наиболее эффективным в ближайшей перспективе путем развития прогнозов погоды на месяц и более представляется сочетание методов гидродинамических прогнозов с методами физико-статистической интерпретации и учетом результатов синоптического анализа.

Современные вычислительные технологии и компьютерные мощности позволяют существенно расширить объем данных, принимаемых во внимание для адекватного описания крупномасштабных процессов. Потенциально такой подход может позволить обнаружить новые закономерности взаимодействия комплексной макросистемы «*подстилающая поверхность — атмосфера*». Учет вертикальной стратификации атмосферы также является перспективным новым элементом в развитии физико-статистических прогностических методов.

Важным направлением исследований представляется изучение статистической неоднородности климатических временных рядов по данным наблюдений и результатам современного физико-математического моделирования с целью выявления периодов повышенной предсказуемости метеорологических процессов и крупных аномалий погоды. Во многих случаях статистические свойства наблюдаемых и моделируемых временных рядов состояний климатической системы являются более сложными, чем предполагается в теории и практике анализа временных рядов, зачастую опирающихся на гипотезы эргодичности, стационарности и другие упрощающие предположения.

Book_Gidromet.indb Sec1:244 13.01.2010 13:14:21

Продолжение на новом уровне синоптических исследований крупномасштабных типов циркуляции, начало которым было положено в трудах классиков отечественной метеорологии А.А. Гирса, Г.Я. Вангейгейма, А.Л. Каца, С.Т. Пагавы и др. еще в середине прошлого века, позволит обеспечить преемственность опыта, накопленного поколениями метеорологов. Наряду с существующими методами типизации циркуляционных механизмов необходимо проводить работы по созданию новых алгоритмов объективной типизации с использованием современных баз метеорологических данных. Потенциальная предсказуемость развития долгоживущих атмосферных процессов, формирующих крупные термические аномалии, должна стать предметом численных экспериментов на базе отечественных и зарубежных моделей.

В ближайшей перспективе ожидается появление новых технологий автоматизации составления региональных детерминистских и вероятностных прогнозов метеорологических величин на сроки от месяца до сезона на основе комплексирования мультимодельных ансамблей прогнозов.

Исследования по указанным направлениям способны внести вклад в усовершенствование методик прогнозирования крупных температурных аномалий и резких смен внутримесячного температурного режима на территории России. Весьма актуальной является задача разработки программно-технических комплексов, посредством которых прогностическая информация об ожидаемых крупных аномалиях температурного режима в регионах России будет автоматически представляться в форме, удобной для использования потребителями в различных отраслях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Батырева О.В., Васильев А.А., Вильфанд Р.М., Волобуев Н.М., Воробьев В.П., Тищенко В.А.* Автоматическая классификация ежедневных полей геопотенциала // Труды Гидрометцентра России, 1999, вып. 330. С. 84—89.
2. *Батырева О.В., Вильфанд Р.М., Лукиянова Л.Е.* Метод сверхдолгосрочного прогноза аномалии средней месячной температуры воздуха по территории СНГ с использованием оптимальной комплексации и результаты его испытания // Информационный сборник № 23 «Проблемы долгосрочного прогноза погоды» / СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. С. 126—129.
3. *Васильев П.П., Васильева Е.Л.* Система статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей для среднесрочного прогноза погоды. // Сборник «70 лет Гидрометцентру России». СПб.: 1999. С. 118—133.
4. *Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Хан В.М.* Априорное оценивание качества статистических прогнозов хода приземной температуры на основе анализа состояния циркуляции в средней тропосфере // Труды Гидрометцентра России, 2003, вып. 338. С. 84—89.

Book_Gidromet.indb Sec1:245 13.01.2010 13:14:21

5. *Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Булдовский Г.С., Шакотько Е.Н., Дождикова О.Л.* Метод долгосрочного прогноза среднемесячной температуры воздуха с нулевой заблаговременностью и сглаженного хода температуры в течение месяца и результаты испытания метода // Информационный сборник «Результаты испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов», 2006. С. 3—24.
6. *Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Хан В.М.* Статистический прогноз хода температуры воздуха внутри месяца с использованием выходных данных гидродинамических моделей // Метеорология и Гидрология, 2007, № 3. С. 5—13.
7. *Вильфанд Р.М., Тищенко В.А., Хан В.М.* Мультимодельный подход при прогнозировании приземной температуры воздуха на сезон // Труды Гидрометцентра России, 2008, вып. 342. С. 3—16.
8. *Козельцева В.Ф., Педь Д.А., Садоков В.П.* О составлении прогноза аномалии температуры воздуха на месяц с нулевой заблаговременностью // Труды Гидрометцентра СССР, 1991, вып. 311. С. 1—14.
9. *Садоков В. П., Вильфанд Р. М.* Новые результаты в разработке статистических методов долгосрочных прогнозов погоды и технология их выпуска. // Сборник «70 лет Гидрометцентру России». СПб.: 1999. С. 134—140.
10. *Филатов А.Н., Муравьев А.В., Реснянский Ю.Д.* Долгосрочный метеорологический прогноз: математические проблемы и возможности гидродинамических моделей // Сборник «70 лет Гидрометцентру России». СПб.: 1999. С. 141—165.
11. *Фролов А.В., Важник А.И.* Интегрированная схема гидродинамического среднесрочного прогноза и объективного анализа глобальных метеорологических полей // Сборник «70 лет Гидрометцентру России». СПб.: 1999. С. 25—43.

Book_Gidromet.indb Sec1:246 13.01.2010 13:14:21

Постпроцессинг модельных долгосрочных прогнозов в Северо-Евразийском климатическом центре

В.Н. Крыжов
Гидрометцентр России

Введение

Северо-Евразийский региональный климатический центр (СЕАКЦ) был создан решением Межгосударственного совета по гидрометеорологии Содружества Независимых Государств (Резолюция № 1.5/18) на его 18-й сессии, состоявшейся 4—5 апреля 2007 г. в Душанбе, Таджикистан. 19-я Сессия Межгосударственного совета по гидрометеорологии Содружества Независимых Государств (16-17 октября 2007 г., г. Обнинск, Российская Федерация) утвердила статус Северо-Евразийского регионального климатического центра (Резолюция № 3.4/19). СЕАКЦ выполняет функции прогностического центра в сети Региональных климатических центров (РКЦ) ВМО в РА VI (Европа) и функции многофункционального РКЦ в РА II (Азия).

Целью создания СЕАКЦ, как и создания региональных сетей РКЦ ВМО, является повышение качества обслуживания климатической информацией, в первую очередь, прогностической. Региональные климатические центры, в том числе и СЕАКЦ, разрабатывают региональные прогнозы на основе прогностических полей рассчитанных глобальными центрами производства прогнозов. Таким образом, СЕАКЦ, выполняя функции РКЦ, фокусирует свою работу на разработке методов региональной интерпретации глобальных прогностических полей в терминах регионального и локального прогноза метеорологических величин.

Постпроцессинг глобальных модельных долгосрочных прогнозов

Прогнозы на месяц/сезон, основанные на интегрировании по моделям общей циркуляции атмосферы под воздействием аномалий состояния подстилающей поверхности, влияющих на тепло- и массообмен, имеют хорошую оправдываемость для тропических районов, особенно для района Эль-Ниньо, где воздействие аномалии

Book_Gidromet.indb 247 13.01.2010 13:14:22

состояния подстилающей поверхности проявляется наиболее сильно. Для средних и высоких широт отношение полезный сигнал/шум в модельных прогнозах остается весьма низким [2, 8, 10].

Важным шагом на пути развития численного прогнозирования с помощью моделей общей циркуляции атмосферы, стало внедрение ансамблевого подхода. Вместо единичного интегрирования на период прогноза, инициируемого практически случайно выбранным состоянием атмосферы, проводится несколько (ансамбль) интегрирований при сходных (необязательно одинаковых) граничных условиях, инициируемых несколькими различными состояниями атмосферы. Результатом такого подхода является также ансамбль прогнозов, в той или иной степени отличающихся друг от друга. Предполагается, что каждый индивидуальный модельный прогноз содержит информативный сигнал и некоторую погрешность, обусловленную «погодным шумом». Из предположения, что эти погрешности случайны и распределены нормально, следует, что информативный сигнал заключен в среднем ансамбля, при этом, разброс может интерпретироваться как характеристика неопределенности прогноза. Действительно, ансамблевый подход привел к значительному повышению оправдываемости прогнозов. В настоящее время, практически все прогностические центры (и российские, и зарубежные) строят свои прогнозы на ансамблевом подходе. Однако и эти, улучшенные прогнозы, имеют весьма скромный уровень оправдываемости, так как «погодный шум» оказался не единственным источником ошибки прогноза.

Мультимодельный ансамбль — это сравнительно новый подход к повышению качества прогнозов. Он получил распространение только в последнее десятилетие и до сих пор имеет весьма ограниченное применение.

Идея, лежащая в основе конструкции мультимодельного ансамбля, хорошо иллюстрируется разложением единичного модельного прогноза X на четыре компонента:

$$X = y + err\_cl + err\_m + err\_n .$$

В этом разложении y — это часть прогноза, положительно коррелируемая (в многолетнем ходе) с наблюдениями; *err_cl* — это смещение климата модели относительно наблюдаемого климата; *err_m* — это ошибка, присущая модели; *err_n* — случайная погрешность — «погодный шум».

Для данной точки пространства и данного отрезка времени *err_cl* — это константа. Смещение климата характеризует качес-

Book_Gidromet.indb 248 13.01.2010 13:14:22

тво модели. В целом, меньшее смещение свидетельствует о более адекватном моделировании процессов в атмосфере. Эту характеристику стоит анализировать при предварительном анализе и отборе моделей, но с точки зрения статистического постпроцессинга модельного прогноза, эта константа значения не имеет, так как при переходе к аномалиям она просто устраняется.

Случайная погрешность *err_n* минимизируется посредством увеличения числа прогонов модели (увеличения ансамбля), а при неограниченном увеличении числа членов ансамбля модели стремится к нулю. Но, как видно из разложения, никакое увеличение ансамбля индивидуальной модели не ведет к уменьшению *err_m* этой модели.

Погрешность *err_m*, присущая модели, обусловлена неадекватным представлением в модели реальных физических процессов. Формирование мультимодельного ансамбля нацелено на минимизацию именно этой ошибки. Легко показать, что в среднем значении прогноза мультимодельного ансамбля, состоящего из осредненных по индивидуальным модельным ансамблям значений прогноза, доля *y* будет превосходить долю *err_m* по сравнению со средними ансамблей индивидуальных моделей. И эта доля будет тем больше, чем слабее (положительная) связь между *err_m* индивидуальных моделей. Действительно, корреляция между компонентами *y* всех моделей равна единице, в то время как корреляция между *err_m* в общем случае отлична от единицы.

Действительно, как показало множество исследований и опыт ряда прогностических центров, использующих этот подход [3, 4, 5, 6, 9, 11], мультимодельный прогноз превосходит по качеству индивидуальные прогнозы всех моделей, входящих в ансамбль. Однако уровень оправдываемости прогнозов и при этом более совершенном подходе остается далек от желаемого. К сожалению, этот вывод в полной мере распространяется и на уровень оправдываемости прогнозов для Северной Евразии (рис. 1). Несмотря на то, что для большей части Северной Евразии мультимодельный прогноз температуры превосходит по успешности случайный прогноз, надежность его все еще далека от требуемой для прикладных задач.

Следует заметить, что идея, лежащая в основе конструкции мультимодельного ансамбля, не предполагает калибровки, то есть введения каких-либо весовых коэффициентов индивидуальных моделей, входящих в ансамбль, в соответствии с мастерством их прошлых прогнозов. В то же время очевидно, что повышение в ансамбле веса моделей с большей долей *y* и меньшей долей *err_m* должно приво-

Book_Gidromet.indb 249 13.01.2010 13:14:23

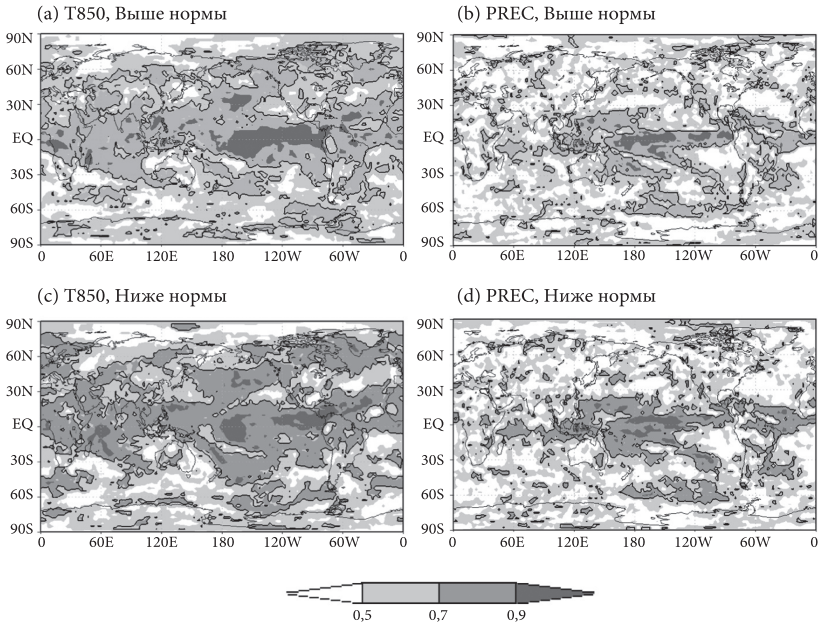


Рис. 1. Оценки сравнительной оперативной характеристики [1] для мультимодельного (семь моделей) сезонного прогноза зимней температуры (левый столбец) и летних осадков (правый столбец) для категорий выше нормы (верхняя строка) и ниже нормы (нижняя строка). Черная линия окаймляет регионы, где оценки значимы на 10% уровне.

дить к повышению успешности прогноза. Однако это очевидное утверждение становится истинным только при условии сохранения (по меньшей мере, на качественном уровне) соотношения между моделями в терминах отношения *y* к *err_m* на достаточно больших временных интервалах.

Как показывает практика, изменение оправдываемости прогнозов (как в сторону улучшения, так и в сторону ухудшения), связанное с введением весовых коэффициентов, носит весьма мозаичный характер, как по пространству, так и во времени [6]. Рис. 2 иллюстрирует очевидное превосходство мультимодельного прогноза по сравнению с индивидуальными прогнозами моделей, входящих в мультимодельный ансамбль (левый рисунок), но калибровка мультимодельных прогнозов в соответствии с успешностью исторических прогнозов индивидуальных моделей, входящих в ансамбль, практически

Book_Gidromet.indb 250 13.01.2010 13:14:23

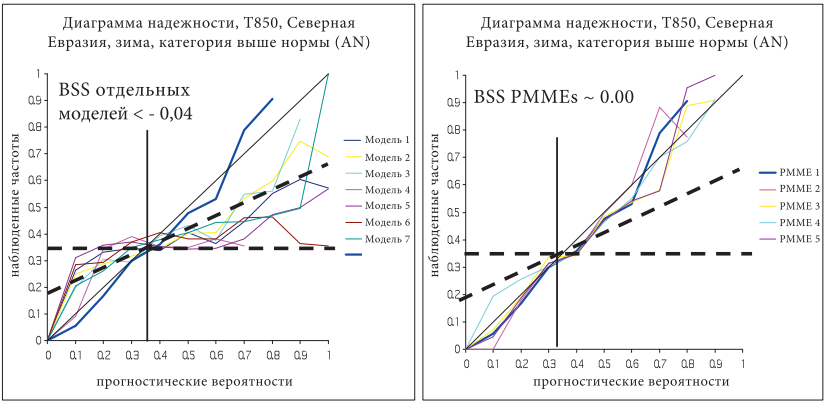


Рис. 2. Диаграмма достоверности [1] для зимней температуры Северной Евразии, категория выше нормы. Левый рисунок: мультимодельный прогноз, не калиброванный в соответствии с успешностью исторических прогнозов (толстая линия) и прогнозы индивидуальных моделей (тонкие линии). Правый рисунок: мультимодельный прогноз, не калиброванный в соответствии с успешностью исторических прогнозов (толстая линия) и мультимодельные прогнозы, калиброванные в соответствии с успешностью исторических прогнозов (тонкие линии).

не отражается на оценках успешности, агрегированных по большому региону (правый рисунок). В то же время, на уровне небольших областей (несколько соседних точек сетки) может наблюдаться как повышение, так и понижение оправдываемости. Основная причина — неустойчивость весовых коэффициентов, рассчитываемых на коротких рядах исторических прогнозов, причем длина этих рядов ограничивается низким качеством наблюдений до 1980-х годов [4, 9]. По-видимому, именно это обстоятельство объясняет, почему большинство оперативных прогностических центров, выпускающих прогнозы для больших регионов, в своей оперативной практике используют только методы, не калиброванные в соответствии с мастерством моделей [6, 7].

Ближайшая перспектива: даунскейлинг

Разумным развитием постпроцессинга модельных сезонных прогнозов представляется даунскейлинг. Следует сразу оговориться, что так называемый динамический даунскейлинг, то есть интегрирование по локальной модели с использованием в качестве гранич-

Book_Gidromet.indb 251 13.01.2010 13:14:23

ных условий результатов интегрирования по глобальной модели, большого смысла не имеет, так как при таком подходе все ошибки глобальных моделей автоматически транслируются на уровень локальной модели. В то же время, как показывает практика, статистические методы даунскейлинга при определенных условиях дают хорошие результаты. К таким условиям относится, прежде всего, способность глобальных моделей прогнозировать предиктор, то есть поля метеорологических величин, с которыми тем или иным образом связаны предиктанты — прогнозируемые локальные метеорологические величины.

Проиллюстрировать данное положение можно на примере прогноза летних осадков в западной части Филиппинского архипелага. Современные модели прогнозировать эти осадки не способны — корреляция между прогнозируемыми и наблюдаемыми осадками незначима. Однако, успешен модельный прогноз ветра в нижней тропосфере, в значительной мере определяющего эти осадки. Даунскейлинг из поля ветра с применением регрессии дает достаточно успешный прогноз осадков на станциях — коэффициент корреляции 0,5—0,7. В то же время для восточной части Филиппин, где летние осадки обусловливаются, главным образом, проходящими тайфунами, не прогнозируемыми моделями, даунскейлинг результата не дает.

Второе условие — это успешный отбор в модельном прогнозе значимого и стабильного предиктора. Количество потенциальных предикторов в модельном прогнозе практически неограниченно — при шаге сетки 2,5°x2,5° прогностическая карта каждой из прогнозируемых переменных — потенциальных предикторов (таких переменных порядка 10 — давление на уровне моря, H_{500}, приземная температура, компоненты скорости ветра в нижней и верхней тропосфере и т.д.) состоит из десяти с половиной тысяч точек (рядов потенциальных предикторов). При этом длина рядов исторических прогнозов весьма мала — 20—30 лет. Даже с учетом предварительного отсеивания маловероятных предикторов число точек, дающих значимые оценки связи (например, коэффициенты корреляции), в том числе и случайные, может достигать сотен. Таким образом, при автоматическом отборе на основе оценок, весьма велика вероятность ошибочного определения предиктора, который может показывать хорошие результаты на зависимом материале и даже, возможно, на кроссвалидированных рядах, но окажется бессмысленным в прогнозе в реальном времени. Решение проблемы только статистическими методами (установление более строгого уровня значимости и т.п.) не гарантирует успех.

Book_Gidromet.indb 252 13.01.2010 13:14:24

Тем не менее, основным все-таки остается выполнение первого условия — достаточно надежный модельный прогноз предиктора. При выполнении этого условия определение предиктора зависит только от профессионализма проведения анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования. ТОМ I. (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты. Издание 1992 г. ВМО № 485. Добавление II.8. Стандартная система проверки оправдываемости (ССПО) долгосрочных прогнозов (ДП). Секретариат Всемирной Метеорологической Организации, Женева — Швейцария, 2005. 173 с.
2. *Barnston, A.G., Mason S., Goddard L., DeWitt D.G., Zebiak S.E.* Increased automation and use of multimodel ensembling in seasonal climate forecasting at the IRI // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2003, vol. 84. P. 1783—1796.
3. *Fritsch J.M., Hilliker J., Ross J., Vislocky R.L.* Model consensus // Wea. Forecasting, 2000, vol. 15. P. 571—582.
4. *Hagedorn R., Doblas-Reyes F.J., Palmer T.N.* The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting—I. Basic concept // Tellus, 2005, 57A. P. 219—233.
5. *Kharin V.V., Zwiers F.W.* Climate predictions with multimodel ensembles, 2002 // J. Climate, 15, 793—799.
6. *Kryjov, V.N., Kang H.-W., Nohara D., Song B.-G., Lee D.-Y., An K.-H., Sohn S.-J., Min Y.-M., Saji N. H., Tam C.-Y.* APCC Technical Report No.1, vol. 1, 2006 // Assessment of the Climate Forecasts Produced by Individual Models and MME Methods. 534 p.
7. *Min, Y.-M., Kryjov V.N., Park C.-K.* A Probabilistic Multimodel Ensemble Approach to Seasonal Prediction // Weather and Forecasting, 2009, vol. 24. P. 812—828.
8. *Peng, P., Kumar A., van den Dool H.* Analysis of multimodel ensemble predictions for seasonal climate anomalies // J. Geophys. Res., 2002, 107, 4710, doi:10.1029/2002JD002712.
9. *Robertson, A.W., Lall U., Zebiak S.E., Goddard L.* Improved combination of multiple atmospheric GCM ensembles for seasonal prediction // Mon. Wea. Rev., 2004, 132. P. 2732–2744.
10. *Shukla J., Anderson J., Baumhefner D., Brankovic C., Chang Y., Kalnay E., Marx L., Palmer T., Paolino D., Ploshay J., Schubert S., Straus D.M., Suarez M., Tribbia J.* Dynamical seasonal prediction // Bull. Amer. Meteor. Soc., 2000, 81. P. 2593—2606.
11. *Yun, W.T., Stefanova L., Krishnamurti T.N.* Improvement of the multimodel superensemble technique for seasonal forecast, 2003 // J. Climate, 16. P. 3834—3840

Геодинамика и гидрометеорологические прогнозы

Н.С. Сидоренков, К.А. Сумерова
Гидрометцентр России

1. Прогнозы гидрометеорологических характеристик

Около ста лет назад Б.П. Мультановский [1] обратил внимание на то, что синоптические процессы эволюционируют не непрерывно, а скачкообразно. Анализируя сборно-кинематические карты, он заметил, что положение барических полей удерживается в течение нескольких дней, а затем быстро (за 12—36 ч) радикально трансформируется. Возникшая картина снова сохраняется несколько дней — до следующей перестройки. В пределах изучаемого им Первого естественного синоптического района (ЕСР), от Гренландии до реки Енисей и к северу от 30° с.ш., однотипный характер эволюции сохраняется в течение нескольких дней. В 1915 г. этот интервал времени Б.П. Мультановский назвал естественным синоптическим периодом (ЕСП). Другими словами, ЕСП есть длительность существования однотипного синоптического процесса в данном ЕСР.

В 40-х годах XX в. стали строить высотные карты барической топографии. Обнаружилось, что картина высотного термобарического поля в тропосфере сохраняется в течение ЕСП. Поле давления и температуры обуславливает перемещение барических образований у земной поверхности и сохранение географического расположения их центров в пределах ЕСР. По окончании периода термобарическое поле тропосферы быстро перестраивается, что вызывает новую локализацию центров барического поля и изменение траекторий барических образований у земной поверхности. Вид сборно-кинематической карты меняется от текущего ЕСП к следующему за один-два дня, т.е. «скачкообразно» по сравнению с длительностью ЕСП, которая варьирует от 5 до 8 дней [2]. Природа ЕСП до работ [3, 5] оставалась неизвестной.

В восьмидесятые годы XX века оптические наблюдения в астрометрии были заменены новыми методами космической геодезии. Точность определения Всемирного времени UT увеличилась на два порядка. В итоге, появилась возможность изучать короткопериодные колебания угловой скорости вращения Земли ω с периодами до суток. С тех пор автор вел синхронный мониторинг приливных

Book_Gidromet.indb 254 13.01.2010 13:14:25

колебаний скорости вращения Земли $\dot{\omega}$, эволюции синоптических процессов в атмосфере, режимов атмосферной циркуляции и вариаций гидрометеорологических характеристик во времени. В результате было замечено, что большая часть перестроек синоптических процессов происходит вблизи моментов смены режима вращения Земли (Сидоренков, 2000). Как известно, из-за эффекта земных зональных приливов в течение лунного месяца (27,3 сут.) наблюдается 4 режима вращения Земли неравной продолжительности — 2 периода ускорения длительностью m_1 и m_3 и 2 периода замедления длительностью m_2 и m_4 (рис. 1). Смена режимов происходит в среднем через $m_i \approx 27{,}3/4 = 6{,}8$ сут., но из-за медленного движения перигея и узлов лунной орбиты этот период изменяется от 5 до 8 сут. Например, в 2006 г. с 29 сентября по 6 октября отмечалось замедление, с 6 по 12 октября — ускорение, с 12 по 19 октября — замедление и с 19 октября по 27 октября — ускорение, т.е. лунный месяц слагался из интервалов 7 + 6 + 7 + 8 сут. (рис. 1). Возможны любые комбинации и любые вещественные значения m_i в диапазоне от 5 до 8 суток. Неизменным здесь остается лишь месячный период 27,3 суток.

На ретроспективных данных автор проверил, как часто экстремумы угловой скорости ω совпадают с моментами перестроек синоптических процессов. В качестве характеристик типов синоптических процессов брались каталоги элементарных синоптических процессов (ЭСП) Г.Я. Вангенгейма (1964). Были подготовлены и проанализированы каталоги перестроек ЭСП и экстремумов (максимумов и мини-

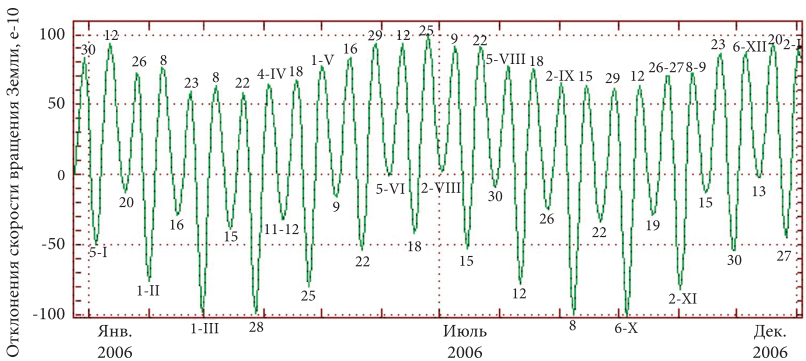


Рис. 1. Приливные колебания скорости вращения Земли в 2006 г. По оси ординат отложены относительные отклонения угловой скорости ν в 10^{-10}.

Book_Gidromet.indb 255 13.01.2010 13:14:25

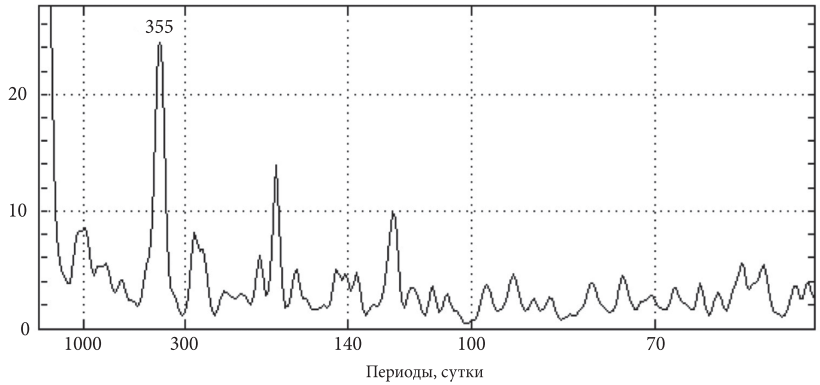


Рис. 2. Спектр среднесуточных значений экваториального компонента h_2 момента импульса атмосферы.

мумов) приливных колебаний угловой скорости ω за 8 лет (с 1 октября 1987 г. по 30 сентября 1995 г. — 2922 дня). Статистический анализ показал, что в 76% случаев моменты экстремумов угловой скорости ω совпадают в пределах ±1 дня с датами перестроек ЭСП. В 34% случаев моменты экстремумов ω отличались на два и более дня от ближайших дат перестроек ЭСП (Сидоренков, 2000).

Таким образом, между приливными колебаниями скорости вращения Земли ω и изменениями синоптических процессов в атмосфере было установлено статистически значимое синхронное соответствие. Выяснилось, что естественные синоптические периоды совпадают с режимами вращения Земли.

Каждому квазинедельному режиму вращения Земли соответствует некоторый естественный синоптический период (ЕСП). Но режимы вращения Земли обусловлены лунно-солнечными приливами, значит, и ЕСП вызываются, возможно, ими же. Нужна была независимая проверка этого предположения на независимых материалах наблюдений.

Для проверки этого вывода были вычислены спектры экваториальных компонент момента импульса атмосферы, которые четко показали полное преобладание гармоник лунно-солнечных приливов [3]. Более того, когда мы вычислили спектр среднесуточных значений экваториального компонента h_2, оказалось, что основной максимум спектральной плотности отмечается не на периоде T_1 солнечного года 365 сут., а на периоде T_2 = 355 сут. (рис. 2).

Book_Gidromet.indb 256 13.01.2010 13:14:25

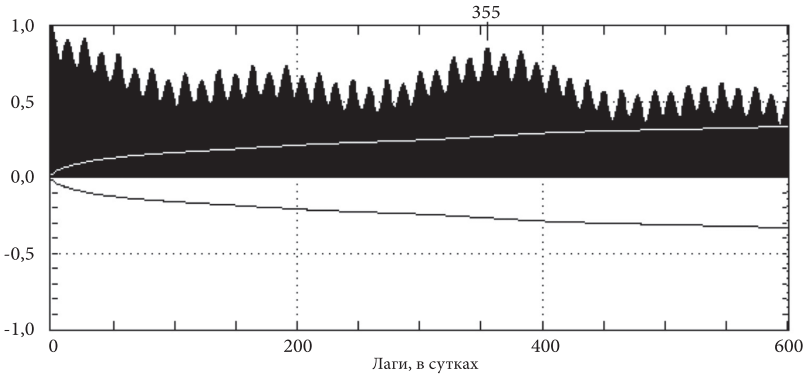


Рис. 3. Автокорреляционная функция временного ряда приливных колебаний скорости вращения Земли с 1962 по 2003 гг. при сдвиге от 0 до 600 суток.

Компонент h_2 характеризует вращение атмосферы относительно оси Ox_2, лежащей в экваториальной плоскости и направленной из центра Земли на точку с координатами $\varphi = 0°$, $\lambda = 90° E$. Т.е. скорость вращения атмосферы относительно оси Ox_2 изменяется с периодом $T_2 = 355$ сут. В спектрах индекса квазидвухлетней цикличности ветра в экваториальной стратосфере (QBO), некоторых коэффициентов сферических гармоник глобального поля атмосферного давления, аномалий некоторых гидрометеорологических характеристик также был обнаружен период T_2, а не T_1. Что же это за период T_2?

Астрономы и народы Востока знают, что это лунный год. В течение этого периода Луна 13 раз обращается вокруг барицентра системы «Земля + Луна»; фазы Луны при этом повторяются 12 раз. Пользуясь астрономическими терминами, можно сказать, что за 355 сут. протекает ровно 13 сидерических (27,32 сут.) и 12 синодических (29,53 сут.) лунных месяцев.

Лунный год является единицей меры времени лунных календарей, сохранившихся в некоторых странах Востока. Его длительность наиболее близка к продолжительности тропического года ($T_1 = 365{,}2422$ сут.), лежащего в основе солнечного календаря.

Период T_2 — это период наибольшей автокорреляции временного ряда приливных колебаний скорости вращения Земли ω. Сдвинем кривую ω предыдущего года на 10 дней назад, и мы получим почти полное совпадение всех деталей приливных колебаний ω текущего года (рис. 3).

Book_Gidromet.indb 257 13.01.2010 13:14:26

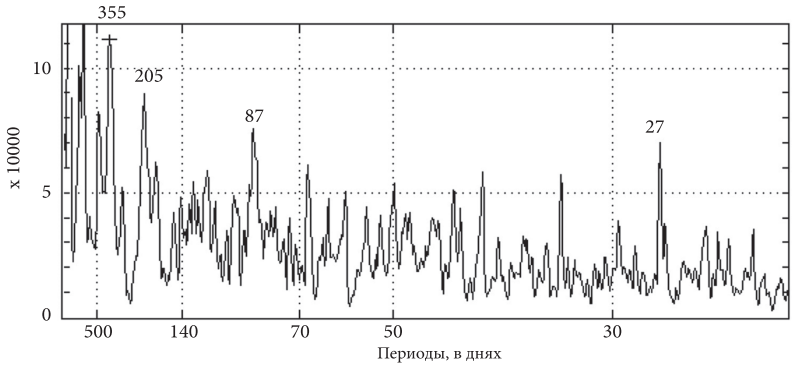


Рис. 4. Периодограмма аномалий температуры воздуха в г. Москве.

Солнечные приливы дают максимальную корреляцию при сдвиге 365 суток, а лунные через каждый сидерический месяц. Поэтому максимум максиморум автокорреляционной функции отмечается при сдвиге 355 дней (13 сидерических месяцев). Большой максимум автокорреляционной функции имеется также при сдвиге 382 дней (14 месяцев).

Найдены тесные связи между лунно-солнечными приливами и вариациями метеорологических характеристик. Для иллюстрации приведем, например, график периодограммы суточных аномалий температуры воздуха в г. Москва по данным за 1960—2003 гг. (рис. 4).

На нем видны пики вблизи периодов 27, 87, 205, 355 дней, соответствующих лунным сидерическим (27,3 сут.) и синодическим (29,5 сут.) периодам. Цикл 206 суток возникает из-за вращения большой оси лунной орбиты относительно большой оси земной орбиты. Перигей лунной орбиты совершает один оборот за 8,85 года, а перигелий земной орбиты — за 1 год. Перигей встречается с перигелием через каждые 412 суток. Но оси лунной и земной орбит становятся коллинеарными через каждые 206 суток. Описанная цикличность взаимных конфигураций двух орбит и воздействует на лунные и земные процессы. Например, продолжительность лунного аномалистического месяца изменяется с этим периодом от 28,5 до 24,8 суток. Земля в своем движении вокруг барицентра зеркально отражает все движения Луны. Поэтому она имеет такие же вариации с периодом 206 суток.

Итак, аномалии температуры воздуха формируются не только внутренней стохастической динамикой атмосферы, но и лунно-

Book_Gidromet.indb 258 13.01.2010 13:14:26

солнечными приливами, которые до некоторой степени повторяются с периодом лунного года T_2 =355 суток (рис. 4). Помимо лунного года имеются еще более длительные циклы: сарос (223 синодических месяцев), Метонов цикл (235 месяцев), инекс (358 месяцев), которые тоже влияют на аномалии температуры.

Приливы влияют на меридиональную циркуляцию воздуха и вариации атмосферного давления. Повышенное давление, вызываемое лунным приливом, приводит летом к положительным аномалиям температуры, а зимой — к отрицательным. Т.е. аномалии температуры в месячном цикле зависят от сезона года. При анализе и прогнозе температуры необходимо учитывать эту зависимость.

Возникает вопрос: можно ли учесть влияние Луны на аномалии температуры воздуха путем вычисления средних многолетних норм, аналогичных солнечным годовым нормам для температуры? К сожалению, сделать это практически невозможно. Дело в том, что геоцентрическое расстояние и склонение Луны изменяются не только с месячным, но и соответственно с периодами 8,847 г. и 18,613 г. Поэтому нормы должны вычисляться за период кратный трем периодам [18,613, 8,847, 1]≈[186/10, 186/21, 186/186], т.е. наименьший период для лунных норм должен быть не год, а хотя бы 186 лет. Но еще необходимо хотя бы десятикратное осреднение для статистической надежности. Т.е. надо иметь 1860-летние ряды наблюдений с суточной дискретностью. Ясно, что вычислить лунные нормы нам не удастся. Поэтому единственный путь учета приливных эффектов Луны в прогнозах аномалий температуры и других гидрометеорологических характеристик есть метод подбора аналогов по колебаниям приливных сил или приливных колебаний угловой скорости ω.

Был разработан следующий способ прогноза гидрометеорологических характеристик [5]. Колебания скорости вращения Земли ω уверенно вычисляются с любой дискретностью и заблаговременностью на основании теории [3]. По предвычисленным на прогнозируемый период (ближайший год) значениям скорости вращения Земли ω с помощью корреляционного анализа определяется аналогичный период в прошлом с таким же примерно режимом вращения Земли. Предполагается, что расписание синоптических процессов и ход аномалий гидрометеорологических характеристик в прогнозируемом отрезке времени будет соответствовать периоду аналогу. Аномалии гидрометеорологических характеристик, наблюдавшиеся в его границах, принимаются за

Book_Gidromet.indb 259 13.01.2010 13:14:27

ожидаемые. Затем к ним прибавляются соответствующие нормы, и таким образом вычисляется прогноз гидрометеорологических характеристик. Один аналог не может отразить весь спектр изменчивости рассматриваемой характеристики. Много аналогов приведут к нулевым аномалиям. Поэтому необходимы дальнейшие исследования по оптимизации выбора аналогов.

Наша методика позволяет предвычислять гидрометеорологические характеристики с суточным разрешением на срок до одного года по любому пункту, где только имеются достаточно продолжительные ряды наблюдений. На практике она используется нами для прогноза температуры воздуха с 1999 г.

Оправдываемость прогнозов среднемесячных аномалий температуры в Москве за 2000—2007 гг. составила ≈70%. Ошибки прогноза возникают, главным образом, из-за сдвигов фазы колебаний на несколько дней. Поэтому наши долгосрочные прогнозы температуры с суточной дискретностью не могут удовлетворить потребителя, интересующегося точным временем наступления изменений температуры, но устроят потребителя, которого интересует не столько время, сколько сам факт наступления таких изменений. Наилучшая оправдываемость прогнозов отмечается в Поволжье, Центральной России и на Северном Кавказе. Заметно хуже результаты по данным высокоширотных и морских станций. В целом, прогнозы, по-видимому, можно считать удачными только по первому ЕСР

2. Долгопериодная изменчивость приливных колебаний и гидрометеорологических процессов

Лунная приливная сила колеблется во времени с периодом 13,65 суток. Она есть функция склонения и геоцентрического расстояния Луны, которые изменяются во времени сложным образом. Амплитуда месячных колебаний склонения Луны изменяется с периодом 18,61 г. от 29° до 18°, из-за регрессии узлов лунной орбиты. Перигей лунной орбиты движется с периодом 8,85 г., что вызывает вариацию квазинедельного периода колебаний приливных сил в пределах от 5 до 8 дней. В итоге, амплитуда колебаний приливных сил изменяется во времени с периодами: 18,61 г., 8,85 г., 6,0 г., 1 г., 0,5 г., месячным, полумесячным, недельным, суточным, полусуточным и многими другими менее значимыми периодами. Изменчивость приливных сил ярче всего заметна в колебаниях вращения Земли. На рис. 5 для сравнения приведены кривые вычисленных приливных колебаний

Book_Gidromet.indb 260 13.01.2010 13:14:27

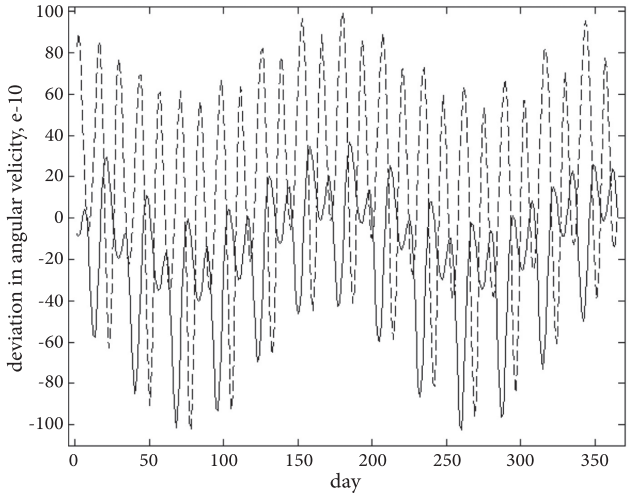


Рис. 5. Приливные колебания угловой скорости вращения Земли в 1997 г. (сплошная) и 2007 г. (пунктирная кривая). По оси ординат отложены относительные отклонения угловой скорости ν в 10^{-10}.

угловой скорости вращения Земли для периодов минимальной (1997 г.) и максимальной (2007 г.) изменчивости приливных сил. Здесь можно увидеть, что амплитуда приливных колебаний угловой скорости в 2007 г. почти в 2 раза больше чем в 1997 г.

В работах [4, 6] вычислена дисперсионная функция *D(t)* приливных колебаний скорости вращения Земли в скользящем годовом окне с 1900 г. по 2012 г. (рис. 6). Видно, что дисперсия *D* изменяется в 3 раза: от минимальной в 1903, 1923, 1942, 1960, 1978, 1997 гг., до максимальной в 1914, 1932, 1950, 1969, 1988, 2007 гг. Минимальной дисперсия *D* бывает при совпадении нисходящего узла лунной орбиты с точкой весеннего равноденствия, а максимальной — при совпадении восходящего узла лунной орбиты с точкой весеннего равноденствия.

Из-за изменчивости приливных сил амплитуда колебаний элементов погоды, метеорологических и морских гидрологических характеристик тоже изменяется во времени с теми же периодами. Но чем больше размах колебаний гидрометеорологических характеристик, тем чаще возникают экстремальные ситуации (аномальные жара или холода, засухи или наводнения, ураганные ветры, сильные грозы, град), тем больший ущерб хозяйству наносят опас-

Book_Gidromet.indb 261 13.01.2010 13:14:28

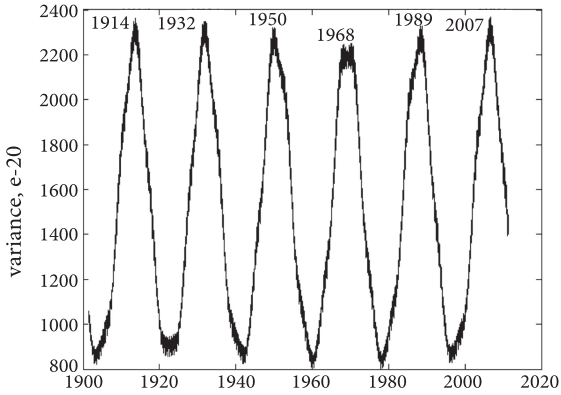


Рис. 6. Дисперсия приливных колебаний скорости вращения Земли в скользящем годовом окне за период 1900—2010 гг.

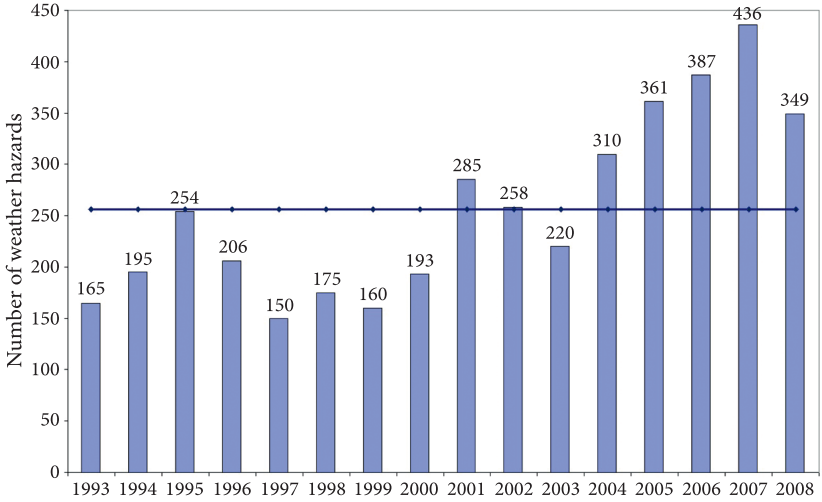


Рис. 7. Изменение годового числа опасных погодных явлений за последние 16 лет по данным Росгидромета. Черная прямая проведена на уровне среднегодового значения за 16 лет.

ные гидрометеорологические явления. Другими словами, частота появления **экстремальных гидрометеорологических процессов** изменяется в соответствии с разнообразными колебаниями при-

Book_Gidromet.indb 262 13.01.2010 13:14:28

ливных сил. Техногенные и социальные процессы тоже испытывают воздействие изменяющихся приливных сил.

В работах [4, 6] показано, что максимумы дисперсии экваториальных компонентов h_1 и h_2 момента импульса атмосферы тяготеют к максимумам изменчивости приливных сил в 1951, 1969, 1987, 2007 гг. Лишь в 80-е годы максимум h_1 несколько опережает максимум приливных сил. Таким образом, многолетняя изменчивость момента импульса атмосферы в определенной степени обусловлена 18,6-летнми вариациями приливных сил.

Статистика опасных гидрометеорологических явлений, проводимая в Гидрометцентре России и в Росгидромете, отчетливо отмечает повышение их в 1998—2007 гг. (рис. 7).

При увеличении (уменьшении) амплитуд приливов возрастает (уменьшается) экстремальность гидрометеорологических процессов. В 2007 г. наблюдался максимум 18,6-летнего цикла изменчивости приливных сил. Поэтому **нараставшая в последние годы частота экстремальных гидрометеорологических процессов обусловлена не только глобальным потеплением климата, но и наблюдавшимся в 2007 г. максимумом изменчивости приливных сил.** В 2008—2016 гг. изменчивость приливных сил будет уменьшаться. Поэтому в этот период времени можно ожидать уменьшения экстремальности гидрометеорологических процессов из-за воздействия приливных сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мультановский Б.П.* Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды // М.: изд. ЦУЕГМС, 1933. 139 с.
2. *Пагава С.Т., Аристов Н.А., Блюмина Л.И., Туркетти З.Л.* Основы синоптического метода сезонных прогнозов погоды // Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 362 с.
3. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли // СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 366 с.
4. *Сидоренков Н.С.* Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы // Природа, № 2, 2008, С. 23—31.
5. *Сидоренков Н.С., Сидоренков П.Н.* «Способ прогноза гидрометеорологических характеристик», патент на изобретение № 2182344 от 10 мая 2002 г.
6. *Sidorenkov N.S.* The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009. 317 p.

Book_Gidromet.indb 263 13.01.2010 13:14:28

Стандартизованная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов (SVSLRF)

А.В. Муравьев
Гидрометцентр России

1. Введение

Проблема оценок качества прогнозов всегда была важна для метеорологии, прогностической практики и для процедур принятия решений в метеозависимых сферах человеческой деятельности. Разнообразие исследуемых величин, особенности их представления в пространстве и времени, большое количество специализированных требований к прогностической продукции со стороны пользователей и т.п. сильно усложняют проблему оценок качества. Однако четко определяемые основные цели верификации, базовые принципы оценивания, выделение характерных свойств, или *атрибутов*, как прогностических схем, так и соответствующих систем оценок [5, 11, 17, 13, 21, 6], позволяют в некоторых условиях формулировать и использовать согласованные наборы показателей качества.

Такого рода консенсус был, в частности, достигнут между некоторыми членами ВМО в проектах по долгосрочным гидродинамическим прогнозам. Первые попытки стандартизации оценок были предприняты во второй половине 90-х для сопоставления результатов *прогнозов с расширенным сроком* (extended range forecasting). В 1998 г. в Тулузе прошла конференция, на которой были предложены *стандартизованные анкеты оценок* для такого рода прогнозов. Эти анкеты включали в себя всего два базовых показателя: *среднеквадратическую оценку качества* по отношению к инерции (RMSSS) и *относительные оперативные характеристики* (ROC) [2]. К концу 90-х более половины стран-членов ВМО имели свои национальные программы по верификации, при этом наиболее активная работа в данном направлении проводилась в Австралийской метеослужбе.

После многочисленных обсуждений и публикаций был подготовлен документ, определяющий согласованные статистические критерии оценок в области долгосрочного прогнозирования,

Book_Gidromet.indb 264 13.01.2010 13:14:29

получивший название «стандартизованная система верификации для долгосрочных прогнозов», Standardised Verification System for Long-Range Forecasts, SVSLRF, [16]. В 2003 году на 14-м Конгрессе ВМО принято решение об использовании этой системы для оценки качества сезонных и годовых прогнозов, составляемых Национальными службами и Региональными климатическими центрами в рамках проектов ВМО по долгосрочному прогнозу. Координация проекта была возложена на Комиссию по основным системам (CBS) в сотрудничестве с Комиссией по атмосферным наукам (CAS) [7]. По заключению Конгресса, стандартизованная система верификации предназначена для того, чтобы сделать долгосрочную прогностическую продукцию более доступной широкому кругу пользователей. Были назначены *совместные управляющие центры* (co-lead centers). В мае 2007 г. на 15-м Конгрессе ВМО Комиссия по основным системам выделила девять Центров подготовки глобальных ДМП, расположенных в городах Мельбурн, Монреаль, Пекин, Тулуза, Токио, Сеул, Эксетер, Вашингтон и Рединг. Результаты верификации прогностической продукции участников проекта, подготовленные в едином формате, размещены в настоящее время на сайте Австралийского метеорологического центра http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/.

2. Состав системы верификации

Вначале уточним терминологию. В английской литературе используются два основных термина: **score** — «оценка», «характеристика», «показатель» качества отдельного прогноза и **skill score** — «критерий качества», «оценка мастерства» прогнозиста или схемы в сравнении с каким-либо другим эталонным или базовым, методом (baseline, reference).

Оценка качества прогнозов (skill scoring) проводится на основе *абсолютных* или *относительных* характеристик. В первом случае, это, по сути, те же отобранные оценки (scores) с возможными обобщениями по пространству или времени, как это делается в *мониторинге* качества в цикле оперативного прогнозирования (например, ежемесячно). Относительное качество (skill score) оценивается в сравнении с некоторым другим прогнозом и имеет универсальный безразмерный и масштабированный вид:

$$skill = \frac{SC_{method} - SC_{base}}{SC_{perfect} - SC_{base}},$$

Book_Gidromet.indb 265 13.01.2010 13:14:29

где используются оценки методического (method), базового (base) и идеального базового прогнозов (perfect). В качестве базовых в оценках долгосрочных прогнозов используются, как правило, случайные, инерционные или климатологические прогнозы. В отличие от *мониторинга* качества, *верификация* проводится на основе относительных показателей, когда прежде всего рассчитываются временные средние характеристики распределений и лишь затем проводится агрегирование по пространству. Следует сразу заметить, что русская терминология в некоторых случаях еще не укрепилась и требует дополнительных обсуждений среди специалистов.

Ниже приводятся четыре группы показателей качества с их английскими названиями: 1) *средний квадратический показатель качества* (**M**ean **S**quared **S**kill **S**core, ***MSSS***), или точнее *показатель по среднему квадрату ошибки*; 2) *показатели надежности* (reliability scores); 3) *относительные оперативные характеристики* (**R**elative **O**perating **C**haracteristics, ***ROC***); 4) *показатель Джеррити* (**G**errity **S**kill **S**core, ***GSS***). Расчетные формулы содержатся в приложении Attachment II-8(2002) к документу [10] и здесь они скопированы в их оригинальном виде.

Введем предварительные обозначения и определения.

Пусть x_{ij} и f_{ij} $(i = 1,\ldots,n)$ обозначают временные ряды наблюдений и непрерывных детерминированных прогнозов для узла сетки или станции j по периоду верификации. Их *средние* по периоду и *выборочные дисперсии* рассчитываются по стандартным формулам:

$$\overline{x}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{ij}, \quad \overline{f}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_{ij};$$

$$s_{xj}^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij} - \overline{x}_j\right)^2, \quad s_{fj}^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(f_{ij} - \overline{f}_j\right)^2.$$

Средний квадрат ошибки (mean squared error) прогноза вычисляется по формуле:

$$MSE_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(f_{ij} - x_{ij}\right)^2.$$

Book_Gidromet.indb 266 13.01.2010 13:14:30

Все оценки, в которых производится осреднение, требуется проводить с так называемой кросс-валидацией, или перекрестной проверкой, по всему периоду верификации [18]. Такая процедура приводит к ослаблению внутрирядовой коррелированности данных, которая может сильно исказить статистические оценки. Используют, как правило, прореживание данных, например, оставляя в расчетах только данные конкретного месяца за каждый год при оценках климатических характеристик выделенного календарного месяца. При соблюдении этих условий средний квадрат ошибки «климатологического» прогноза рассчитывается по формуле:

$$MSE_{cj} = \left(\frac{n}{n-1}\right)^2 s_{xj}^2.$$

Показатель MSSS для точки *j* и для области определяется согласно следствию из основного уравнения для интегральной оценки качества (skill), когда $SC_{perfect} = 0$:

$$MSSS_j = 1 - \frac{MSE_j}{MSE_{cj}}, \qquad MSSS = 1 - \frac{\sum_j w_j\, MSE_j}{\sum_j w_j\, MSE_{cj}},$$

где $w_j = 1$ для станций и $w_j = cos(\theta_j)$ для широты θ_j точки сетки *j*. Для обоих показателей $MSSS_j$ или *MSSS* соответствующая оценка ***среднеквадратического показателя качества*** (*Root Mean Squared Skill Score*, *RMSSS*) рассчитывается по формуле

$$RMSSS = 1 - \left(1 - MSSS\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Показатель $MSSS_j$ далее представляется в виде ***разложения Мерфи***:

$$MSSS_j = \left\{ 2\frac{s_{fj}}{s_{xj}}\, r_{fxj} - \left(\frac{s_{fj}}{s_{xj}}\right)^2 - \left(\frac{\left[\bar{f}_j - \bar{x}_j\right]}{s_{xj}}\right)^2 + \frac{2n-1}{\left(n-1\right)^2} \right\} \Bigg/ \left\{ \frac{n^2}{\left(n-1\right)^2} \right\},$$

где r_{fxj} — корреляция прогнозов и наблюдений по точке или станции *j*:

$$r_{fxj} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(f_{ij} - \bar{f}_j\right)\left(x_{ij} - \bar{x}_j\right)}{s_{fj}\, s_{xj}}.$$

Book_Gidromet.indb 267 13.01.2010 13:14:30

Здесь первые три члена декомпозиции $\boldsymbol{MSSS_j}$ относятся к: 1) фазовым ошибкам (корреляция); 2) амплитудным ошибкам (отношение дисперсий); 3) суммарной систематической ошибке прогнозов [12].

Дополнительно для каждой точки (j) в отчете могут быть представлены и исходные величины:

$$n,\ \bar{f}_j,\ \bar{x}_j,\ s_{fj},\ s_{xj},\ r_{fxj},\ MSE_j,\ MSE_{cj},\ MSSS_j.$$

При оценке качества прогнозов относительно *инерции* рекомендуется использовать кросс-валидированную *подавленную инерцию* (*damped persistence*). Прогноз *обычной инерции* (*ordinary persistence*) для заданного параметра и заданного периода относится к неизменной аномалии на интервале времени, предшествующем интервалу заблаговременности. Этот период, очевидно, должен иметь ту же длину, что и прогностический. Однако обычная инерция никогда не рекомендуется в качестве базовой при квадратичной оценке качества прогнозов. Это связано с тем, что в данной схеме оценок качество обычной инерции легко превысить учетом временной корреляции. Для устранения искусственного завышения квадратичных мер качества обычная инерция *подавляется* умножением аномалии $x_{ij}\left(t-\Delta t\right)-\ \bar{x}_{ij}^{\,m}\left(t-\Delta t\right)$ на корреляцию соответствующих аномалий:

$$r_{\Delta,j}^{m}=\frac{\frac{1}{m}\sum_{m}\left[x_{ij}\left(t-\Delta t\right)-\bar{x}_{ij}^{\,m}\left(t-\Delta t\right)\right]\left[x_{ij}\left(t\right)-\bar{x}_{ij}^{\,m}\left(t\right)\right]}{s_{xj}^{\,m}\left(t-\Delta t\right)s_{xj}^{\,m}\left(t\right)},$$

где t — прогностический период, t–Δt — период постоянства аномалии, индекс m обозначает суммирование по правилам кросс-валидации.

Расчет таблиц сопряженности и показателей для категорийных детерминированных прогнозов

Если x_i и f_i обозначают наблюдение и соответствующий прогноз категории i (i = 1, 2, 3), то пусть n_{ij} — количество случаев, когда прогнозировалась категория i, а наблюдалась категория j. Полная трехвходовая таблица сопряженности представляет собой набор из 9 чисел n_{ij}.

Book_Gidromet.indb 268 13.01.2010 13:14:31

Таблица 1

Стандартная таблица сопряженности 3x3

		Наблюдения			
		Ниже нормы	Около нормы	Выше нормы	
Прогноз	Ниже нормы	n_{11}	n_{12}	n_{13}	$n_{1\bullet}$
	Около нормы	n_{21}	n_{22}	n_{23}	$n_{2\bullet}$
	Выше нормы	n_{31}	n_{32}	n_{33}	$n_{3\bullet}$
		$n_{\bullet 1}$	$n_{\bullet 2}$	$n_{\bullet 3}$	T

Значения $n_{i\bullet}$ и $n_{\bullet i}$ представляют суммы соответствующих значений по строкам и столбцам; T — полное количество случаев. Для получения таблицы сопряженности 3x3 требуется, как правило, не *менее 90 пар прогноз/наблюдение*. При агрегировании используются веса, как указано выше.

Относительные выборочные частоты (*relative sample frequencies*) p_{ij} и *выборочные распределения вероятностей* прогнозов $p(f)$ и наблюдений $p(x)$ рассчитываются по формулам: $p_{ij}=n_{ij}/T$ *и*

$$p\left(f_i\right)=\sum_{j=1}^{3}p_{ij}=\hat{p}_i;\;\; i=1,...,3;\;\; p\left(x_i\right)=\sum_{j=1}^{3}p_{ij}=p_i;\;\; i=1,...,3$$

Показатель Джеррити рассчитывается с помощью матрицы очков или весов (*scoring matrix*) s_{ij} (ij = 1,…,3), которая представляет собой меру вознаграждения или штрафа: $GSS=\sum_{i=1}^{3}\sum_{i=1}^{3}p_{ij}s_{ij}$. Очки получаются по формулам:

$$s_{ii}=\frac{1}{2}\left(\sum_{r=1}^{i-1}a_r^{-1}+\sum_{r=i}^{2}a_r\right);$$

$$s_{ij}=\frac{1}{2}\left[\sum_{r=1}^{i-1}a_r^{-1}-\left(j-i\right)+\sum_{r=j}^{2}a_r\right];\;\; 1\le i<3,\, i<j\le 3,$$

где $a_i=(1-\sum_{r=1}^{i}p_r)/\sum_{r=1}^{i}p_r$.

Оценка *GSS* рассчитывается с помощью выборочных вероятностей, а не исходных вероятностей категорий (0,33; 0,33; 0,33).

Book_Gidromet.indb 269 13.01.2010 13:14:31

Таблица 2

Стандартная таблица сопряженности для расчета показателя ROC в случае детерминированных прогнозов

		Наблюдения события		
		ДА	НЕТ	
Прогноз события	ДА	O_1	NO_1	$O_1 + NO_1$
	НЕТ	O_2	NO_2	$O_2 + O_2$
		$O_1 + O_2$	$NO_1 + NO_2$	T

Примечания

O_1 — количество верных прогнозов (*попаданий*): $O_1 = \sum W_i \left(OF\right)_i$;
(*OF*) = 1, когда событие осуществилось, и 0 в противном случае. Суммирование производится по всем узлам сетки или по станциям.

NO_1 — количество *ложных тревог*: $NO_1 = \sum W_i \left(NOF\right)_i$;
(*NOF*) = 1, если событие не осуществилось, но было предсказано, 0 — в противном случае.

O_2 — количество промахов: $O_2 = \sum W_i \left(ONF\right)_i$;
(*ONF*) = 1, если событие совершилось, но не было спрогнозировано, 0 — в противном случае;

NO_2 — количество правильных отклонений: $NO_2 = \sum W_i \left(NONF\right)_i$;
(NONF)=1, если событие не наблюдалось и не было прогнозировано, 0 — в противном случае.

Долю попаданий (Hit Rate, *HR*) определяют следующим образом:

$$HR = \frac{O_1}{\left(O_1 + O_2\right)}$$

и *HR* изменяется от 0 до 1, при *HR*=1 — все осуществления события были правильно предсказаны. Доля ложных тревог (False Alarm Rate, FAR):

$$FAR = \frac{NO_1}{\left(NO_1 + NO_2\right)}.$$

FAR изменяется от 0 до 1, при *FAR*=0 — никаких неосуществившихся событий не предсказывалось. Для детерминированных прогнозов рассчитывается так называемый «показатель Хансена-Куиперса» (1965):

Book_Gidromet.indb 270 13.01.2010 13:14:32

$$KS = HR - FAR = \frac{O_1 NO_2 - O_2 NO_1}{(O_1 + O_2)(NO_1 + NO_2)}.$$

KS изменяется, как известно, от –1 до +1, последнее значение при идеальном прогнозе (*HR*=1, *FAR*=0). В разделе о «беспристрастных оценках» будет сказано несколько слов о разнообразии наименований данного показателя.

Расчет показателя ROC для вероятностных прогнозов

Общая таблица сопряженности для бинарных событий по порогам вероятности выглядит следующим образом.

Таблица 3

Стандартная таблица ROC для вероятностного прогноза бинарных событий по порогам вероятности

Номер градации	Прогностические вероятности	ФАКТ	
		ДА	НЕТ
1	0-P_2 (%)	O_1	NO_1
2	P_2-P_3 (%)	O_2	NO_2
3	P_3-P_4 (%)	O_3	NO_3
•••	•••	•••	•••
n	P_n-P_{n+1} (%)	O_n	NO_n
•••	•••	•••	•••
N	P_N-100 (%)	O_N	NO_N

Примечания

n — номер n-го интервала вероятности (градация n); n от 1 до N;

P_n — нижний предел вероятности для градации n;

P_{n+1} — верхний предел вероятности для градации n;

N — количество интервалов вероятности или градаций.

$O_n = \sum W_i (O)_i$, (O)=1, когда событие прогнозируется как попадающее в градацию n, и наблюдается как совершившееся; 0 — в противном случае. Суммирование производится по всем узлам сетки или станциям.

$NO_n = \sum W_i (NO)_i$, (NO) = 1, когда событие прогнозировалось, но не наблюдалось; 0 — в противном случае. Суммирование производится по всем узлам сетки или станциям.

Book_Gidromet.indb 271 13.01.2010 13:14:32

Таблица 4

Стандартная таблица ROC для вероятностного прогноза бинарных событий в ансамблевом прогнозе

Номер градации	Распределение членов ансамбля	ФАКТ	
		ДА	НЕТ
1	F=0, NF=M	O_1	NO_1
2	F=1, NF=M-1	O_2	NO_2
3	F=2, NF=M-2	O_3	NO_3
•••		•••	•••
n	F=n-1, NF=M-n+1	O_n	NO_n
•••		•••	•••
N	F=M, NF=0	O_N	NO_N

Примечания

M — номер члена ансамбля;

n — номер градации; n изменяется от 1 до N=M+1;

F — количество членов, предсказывающих осуществление события;

NF — количество членов, предсказывающих неосуществление события.

Градации могут быть «агрегированы» по пространству: $O_n = \sum W_i \left(O\right)_i$, (O)=1, если событие с вероятностью в градации n наблюдается как осуществленное; 0 — в противном случае. Суммирование проводится по всем прогнозам в градации n, по всем точкам сетки i или станциям i. Далее $NO_n = \sum W_i \left(NO\right)_i$, (NO)=1, если событие с вероятностью в градации n наблюдается как НЕосуществленное; 0 — в противном случае. Суммирование проводится по всем прогнозам в градации n (по всем точкам сетки или по станциям).

Доли попаданий и ложных тревог рассчитываются для каждого порога вероятности P_n (таблицы 3 и 4).

$$HR_n = \sum_{i=n}^{N} O_i / \sum_{i=1}^{N} O_i ; \qquad FAR_R = \sum_{i=n}^{N} NO_i / \sum_{i=1}^{N} NO_i$$

где n изменяется от 1 до N. Показатель HR_n изменяется от 0 до 1, последнее значение отвечает наиболее высокому качеству. FAR_n изменяется от 0 до 1, последнее значение отвечает наиболее высокому качеству прогностической системы. Часто используют интервалы вероятности в 10% (10 градаций, N=10). Однако количество градаций должно согласовываться с количеством членов ансамбля. Например, для девятичленного ансамбля больше подходит интервал 33%.

Book_Gidromet.indb 272 13.01.2010 13:14:33

Площадь под кривой ROC используется в качестве суммарной статистики, отражающей мастерство прогностической системы. Площадь масштабируется так, чтобы идеальной системе соответствовала площадь, равная единице, а системе, не дающей никакой прогностической информации, площадь 0,5.

Расчет диаграмм надежности и гистограмм частот

Диаграммы надежности строятся на том же материале, что и кривые оперативных характеристик ROC:

$$HR_n = \frac{O_n}{O_n + NO_n}$$

Гистограммы частот строятся по тем же таблицам сопряженности и показывают частоту прогнозов как функцию градаций вероятностей. Частота прогнозов F_n для вероятностной градации n определяется следующим образом: $F_n = \frac{O_n + NO_n}{T}$, где T является суммарным количеством прогнозов $T = \sum_{n=1}^{N} (O_n + NO_n)$.

Расчет уровней значимости характеристик верификации

При оценке качества прогнозов необходимо убедиться в том, что полученное *улучшение* качества неслучайно. Оценки значимости полученных статистических характеристик проводятся как асимптотическими, так и непараметрическими способами. В первом случае приходится полагаться на гипотезы, которые, как правило, выполняются при независимости и нормальности распределения используемых величин. Однако в природе многие величины коррелированы как в пространстве, так и во времени. Временна́я корреляция означает, что *инерция* дает более хороший прогноз, чем *климат*. Когда имеется пространственная корреляция в прогнозах и наблюдениях, то точные/неточные прогнозы могут охватывать значительные области высокой корреляции. Это иногда кардинальным образом влияет на значимость, делая ее несопоставимой с теми оценками, которые были бы при расчетах по независимым (или хотя бы некоррелированным) данным. Среди методов оценок значимости важнейшими являются: асимптотические оценки (критерии Стьюдента, Фишера), непараметрические оценки

Book_Gidromet.indb 273 13.01.2010 13:14:33

(Вилкоксона, Манна-Уитни, Колмогорова-Смирнова) и рандомизированные критерии (Монте-Карло, бутстреп, кросс-валидация).

3. Некоторые особенности системы SVSLRF

Обсудим подробнее те особенности, которые мало освещены в русскоязычной специальной литературе: а) разложение Мерфи; б) использование методологии из теории принятия решений; в) формализация понятия «беспристрастных» оценок качества.

А. Разложение Мерфи

В статье [12] объектом исследования являются критерии качества SS, основанные на среднем квадрате ошибок MSE и на коэффициенте корреляции r. Несмотря на давние предостережения Брайера и Аллана [5] относительно недостатков коэффициента корреляции как меры качества прогнозов, данный показатель находит большое применение в верификации. А. Мерфи проводит разложение среднего квадрата ошибки на три части, из которых явно вытекают, во-первых, взаимосвязь с коэффициентом корреляции и, во-вторых, такие свойства данного коэффициента, которые существенно влияют на сам критерий качества. Обозначим, как и ранее, через (*f, x*) — набор *n* индексированных пар «*прогноз-наблюдение*», выборочные средние обозначим верхними чертами $\overline{f}$, $\overline{x}$, дисперсии — через s_f^2, s_x^2, коэффициент корреляции между прогнозом и наблюдением — через r_{fx}. Далее легко получается равенство

$$MSE(f,x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[(f_i - \overline{f}) - (x_i - \overline{x}) + (\overline{f} - \overline{x})]^2 = \\ = (\overline{f} - \overline{x})^2 + s_f^2 + s_x^2 - 2 s_f s_x r_{fx}. \quad (1)$$

Переходя к оценке качества, получаем окончательную формулу

$$SS(f,\overline{x},x) = 1 - [MSE(f,x)/MSE(\overline{x},x)] = \\ = 2(s_f/s_x) r_{fx} - (s_f/s_x)^2 - [(\overline{f} - \overline{x})/s_x]^2 = \\ = r_{fx}^2 - [r_{fx} - (s_f/s_x)]^2 - [(\overline{f} - \overline{x})/s_x]^2. \quad (2)$$

В нижней строчке формулы (2) три члена обозначаются через IA, IB, IC. В качестве *средней величины* наблюдений можно рассматривать несколько вариантов: средняя по выборке, средняя по всему

Book_Gidromet.indb 274 13.01.2010 13:14:34

интервалу, средняя по историческому архиву. Тогда в формуле (2) в трех случаях, кроме случая средней по выборочному интервалу, появятся дополнительные к IA, IB, IC члены, отражающие степень соответствия между средними из разных *климатологий,* а также между климатологией и наблюдениями. А это значит, что использование коэффициента корреляции как показателя качества прогнозов — без учета такого рода соответствий — приводит к завышению или занижению оценки качества по среднему квадрату ошибки.

Б. Относительная оперативная характеристика

В теории обнаружения сигналов и в практике медицинской диагностики используется словосочетание Receiver Operating Characteristic, что буквально означает «*рабочая характеристика приемника*». Перевод на русский иногда дается как «*эксплуатационная*», или «*рабочая характеристика*», а также как «*кривая соотношений правильного и ложного обнаружения сигналов*». Словосочетание operating characteristic (оперативная характеристика) используется в статистическом планировании контроля качества продукции. В частности, в Энциклопедическом словаре [1] оперативная характеристика определяется как: 1) дополнение до единицы функции мощности статистического критерия (ошибка второго рода); 2) вероятность приемки партии продукции, рассматриваемая как функция числа дефектных изделий. Введение данных характеристик имело целью оптимизацию тех или иных решений при учете ошибок первого и второго рода. Круг вовлекаемых теоретических вопросов необычайно широк и включает в себя такие разделы науки, как теория Неймана и Пирсона проверки гипотез и «индуктивного поведения», последовательный анализ Вальда и теории оптимальных остановок, теория игр и теория оптимального управления.

Собственно, об оптимальном учете ошибок первого и второго рода идет речь при формулировке принципов построения кривой ROC. Эпитет «относительная» вместо сугубо технического «ресиверная» был предложен Д. Светсом, одним из инициаторов внедрения ROC в диагностику и принятие решений в клинической медицине и психологии [19, 20]. Впрочем, до сих пор во многих работах остается термин Receiver Operating Characteristic.

Впервые расчеты кривой ROC были предприняты в ВМС США для оценки качества радарных установок по обнаружению самолетов противника на основе «светимости» области экрана. В такой обстановке вопрос звучал двойственно: по заданной светимости определен

Book_Gidromet.indb 275 13.01.2010 13:14:34

самолет или нечто иное, например, стая птиц или облако? На основе множества проверочных процедур для каждого порога светимости строились бинарные таблицы сопряженности со входами «*диагностика-наблюдение*» и вычерчивалась искомая кривая оперативной характеристики. По ней далее принималось решение о приемке разработанного радара на вооружение.

В послевоенные годы кривые ROC стали проникать в самые разные отрасли экономики, науки, медицинской диагностики, прогнозирования погоды и т.д. Методологическая трудность при верификации прогностической схемы состоит в разумном сведении задачи к бинарной и в выборе *управляющего параметра*. В прогностических задачах бинарность (дихотомичность) означает определение *явления*, которое чаще всего задается системой неравенств для некоторой метеорологической величины. В качестве *управляющего параметра* можно взять *количество* M *членов в ансамбле*.

Представим построение кривой ROC в виде четырех шагов, описанных подробно в [20]. Предположим, что прогнозируется градация НОРМА на основе *количества* M *членов ансамбля*, попавших в данную градацию.

ШАГ 1. Построение графика частот появления/непоявления события в зависимости от значений управляющего параметра

Если прогностическая система разумна, то следует ожидать, что при увеличении количества членов ансамбля, попадающих в выделенную градацию, количество реальных ситуаций в данной градации также растет. Пусть прогностический объем ансамбля составляет 50 членов. Предположим, что при попадании в градацию менее 5 членов ансамбля всегда имела место аномальная погода, и при попадании в градацию «НОРМА» более 45 случаев всегда имела место «НОРМАЛЬНАЯ» погода. Строятся две кривые условного распределения наблюдений «НОРМА» и «НЕ НОРМА» при прогнозе градации «НОРМА» с последующей нормировкой на общее количество наблюдений (рис. 1). Таким образом, можно считать, что на рис. 1 представлены соответствующие ФПР.

В промежутке между 5 и 45 членами ансамбля графики пересекаются: при попадании в «НОРМУ», скажем, 25 членов прогностического ансамбля наблюдались случаи как нормальной, так и аномальной погоды. Возникает естественный вопрос: насколько хорошо отделяет наша схема прогноза данную градацию?

Book_Gidromet.indb 276 13.01.2010 13:14:35

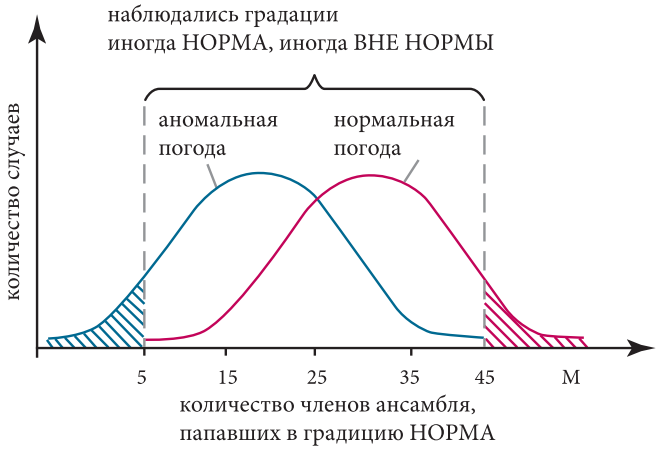


Рис. 1. Графики количества соответствующих случаев появления/непоявления события в зависимости от управляющего параметра. Количество случаев представлено в относительном виде и может интерпретироваться как частота.

ШАГ 2. Выделение критических областей с помощью пороговой линии

Для некоторого *порогового* значения управляющего параметра, скажем, M=20, проводим линию, параллельную оси ординат. Этот порог определяет прогностическое *решение*: если в ансамбле меньше 20 членов, то даем прогноз «АНОМАЛИЙ», а если больше — то прогнозируем «НОРМУ». На рис. 2 обозначены и названы все критические области, отсекаемые данной линией.

Рассмотрим выделенные области. На верхней кривой в 10% случаев была спрогнозирована норма, а осуществились аномалии, это — *промахи*; в 90% случаев прогнозировалась и осуществилась норма, это — *попадания*. На нижней кривой в 50% случаев слева прогнозировались и осуществились аномалии, это — *верные прогнозы* аномалий; в 50% случаев справа прогнозировались нормы, а осуществились аномалии, это — *ложные тревоги*; последнее словосочетание, впрочем, более подходит при прогнозе экстремального явления, при прогнозе нормы это можно было бы назвать *ложным успокоением*. Так как выделенные площади равны соответствующим *долям*, то в схеме верификации это уточнение входит в терминологию: говорят о *доли попаданий* и *доли ложных тревог*, или о соответствующих *вероятностях*.

Book_Gidromet.indb 277 13.01.2010 13:14:35

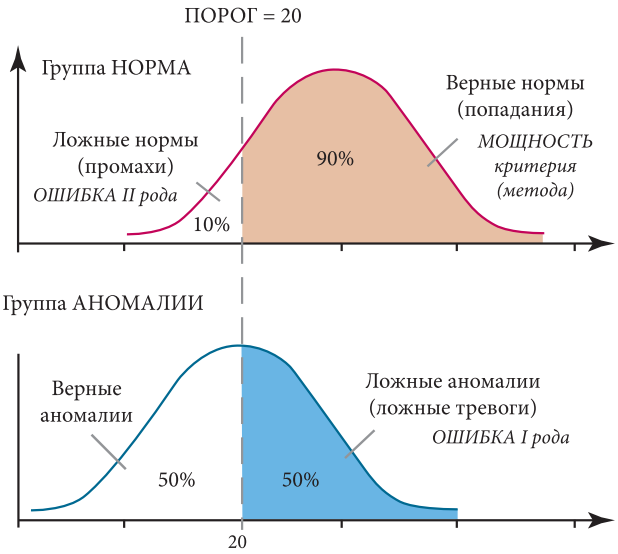


Рис. 2. Плотности распределения наблюдений для условий прогноза НОРМЫ (вверху) и АНОМАЛИЙ (внизу) по данным рис. 1. Выделен порог в 20 членов прогностического ансамбля.

В теории статистической проверки гипотез *доля ложных тревог* равносильна вероятности ошибки первого рода. *Доля попаданий* равна дополнению до единицы вероятности промахов, что, по определению, является *мощностью* критерия, или мощностью прогностической схемы в дискриминации градации НОРМА.

ШАГ 3. Построение кривой относительной оперативной характеристики

Для каждого значения порога, начиная от крайнего левого (в нашем случае от M=0), построим на графике [0,1]×[0,1] точки в координатах (*доля ложных тревог*, *доля попаданий*)=(FAR, HR). Напомним еще раз, что эти доли равны в точности площадям тех областей под ФПР, которые расположены справа от пороговой кривой. Данная кривая и является искомой кривой ROC, при этом построение кривой начинается из правого верхнего угла, так как по графикам ФПР видно, что при движении пороговой кривой от значения M=0 справа лежат обе кривые ФПР пол-

Book_Gidromet.indb 278 13.01.2010 13:14:35

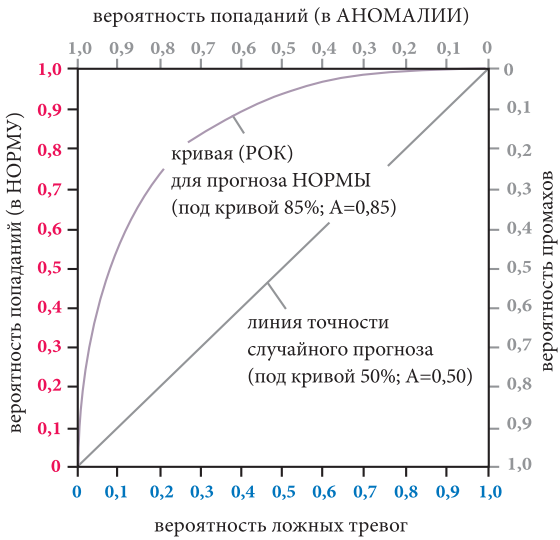


Рис. 3. Кривая относительной оперативной характеристики. По осям выделены значения долей, относительно которых можно однозначно построить кривую характеристики: либо по паре FAR-HR, либо по паре «доля промахов — доля верных попаданий в аномалии».

ностью, что и соответствует координате точки (1,1). Иногда на кривой выставляются значения управляющего параметра, особенно при оценке оперативной характеристики по ограниченному количеству значений М.

Если ROC совпадает с главной диагональю, то FAR = HR, т.е. обе кривые ФПР сливаются и предложенная диагностическая (прогностическая) схема НЕ различает дихотомические ситуации. Выбор равносилен бросанию монеты. Если ROC стремится к верхнему левому углу, то точность разделения увеличивается, кривые ФПР раздвигаются в стороны, в идеале, полностью не пересекаясь. Можно уменьшать ошибку второго рода, не опасаясь делать это за счет точности попадания.

В качестве интегральной оценки *точности* испытываемой методики естественно взять площадь под кривой А. Если А=0,5, то методика полностью неинформативна, ее эффективность сравнима со случайным прогнозом. Приведенное на рис. 3 значение А=0,85 означает, что 85% графика лежит под кривой ROC — в долгосрочных прогнозах такие показатели считаются чрезвычайно успешными.

Book_Gidromet.indb 279 13.01.2010 13:14:36

Нетрудно построить аналитическую формулу для данной характеристики. Обозначим управляющий параметр через *y*, в общей постановке он непрерывен и не ограничен: $y \in (-\infty, +\infty)$. Далее обозначим индикатор попадания в «градацию/вне градации» через D=1 или 0, а пороговое значение управляющего параметра — через *c*. Соответствующие кумулятивные функции распределения равны $F_D(c) = \Pr(y \le c \mid D = 1)$ и $F_{\bar{D}}(c) = \Pr(y \le c \mid D = 0)$. Обозначим далее соответствующие дополнения до единицы: $S_D(*) = 1 - F_D(*)$ и $S_{\bar{D}}(*) = 1 - F_{\bar{D}}(*)$, тогда искомое соответствие равно $ROC(t) = S_D\{S_{\bar{D}}^{-1}(t)\}$, $t \in (0,1)$. Другие аналитические особенности приводятся, например, в [6].

ШАГ 4. Выбор порогового значения для принятия конкретного решения

После предыдущих шагов исследователь получает интегральную оценку качества своей методики *«диагноза-прогноза»* и может использовать кривую ROC для принятия решения в конкретной прогностической ситуации. Это означает естественный переход к *категорическому* прогнозу определенной градации при наличии заданного количества членов ансамбля, попавших в данную градацию.

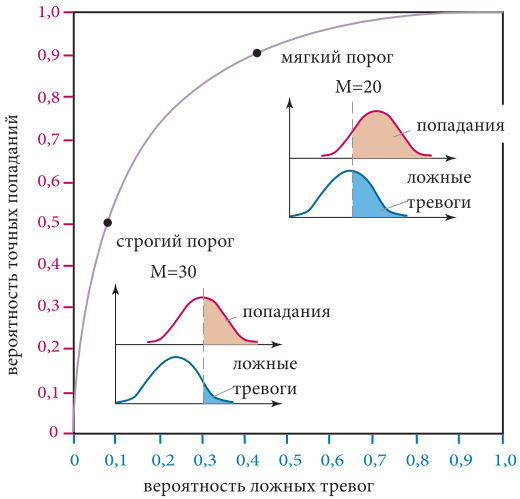


Рис. 4. Принятие решения о выборе порогового значения. Переход к категорическому прогнозу.

Book_Gidromet.indb 280 13.01.2010 13:14:36

Конечно, первое условие — это приемлемый уровень интегрального качества, оцененного по площади под кривой. Предположим, что удовлетворительный уровень достигнут и кривая ROC выглядит следующим образом (рис. 4).

Требуется выбрать такой порог (**на** кривой), который гарантирует достаточное количество попаданий, но не за счет высокого уровня ложных тревог: ошибка первого рода уменьшается не за счет ошибок второго рода. Именно в этом, наряду с графической отчетливостью, заключается привлекательность разработанного статистического метода принятия решения. Каждая точка на кривой ROC соответствует некоторому порогу. *Строгие* пороги слева внизу (M=30) уменьшают количество *ложных тревог* за счет малого количества *попаданий*. *Мягкие* пороги справа наверху максимизируют обнаружение искомой градации «НОРМА» за счет большого количества ложно спрогнозированных НОРМ.

Какой порог выбрать между этими крайними случаями зависит от нескольких обстоятельств: серьезность прогнозируемого явления, ее климатологическая частота, доступность средств для предотвращения возможных последствий от данного явления, финансовые, социально-политические и прочие затраты от ложных тревог.

Наконец, сравнение разных прогностических методик по величине площади под кривой позволяет администрации принимать решения (иногда кардинальные) о судьбе той или ной схемы, учитывая перспективы развития и возможные затраты на совершенствование, состав и квалификацию коллектива разработчиков.

Несколько слов о перспективах развития методологии относительных оперативных характеристик. В тех сферах науки и техники, в которых используются оперативные характеристики, происходят самые разнообразные исследования, уточнения, модификации и интерпретации ROC. Что касается прогностической практики, то произошло естественное объединение ROC с проблематикой экономической «полезности» (*стоимости, эффективности,* economic value), в особенности в связи с бурным развитием ансамблевого прогнозирования [15]. С конца 90-х на сайтах мировых прогностических центров (США и ЕЦСПП) стали регулярно выкладываться оценки экономической эффективности ансамблей среднесрочных прогнозов.

Таблицы сопряженности, использованные при расчете кривой ROC, оказались чрезвычайно удобными для оценок «полезности» прогнозов в сравнении с климатологией. При этом в ячейки табли-

Book_Gidromet.indb 281 13.01.2010 13:14:37

цы сопряженности добавляются возможные издержки потребителя. Опуская подробности, укажем формулу расчета полезности прогностической схемы:

$$V = \frac{E_{climate} - E_{forecast}}{E_{climate} - E_{perfect}} = \frac{Min[o, r] - (h + f)r - m}{Min[o, r] - o \cdot r},$$

где $E_{climate}$, $E_{forecast}$ и $E_{perfect}$ — ожидаемые затраты при использовании исключительно климатологии, методического прогноза и «идеального» прогноза; h и f — оценки вероятности попаданий и ложных тревог в таблице сопряженности «*прогноз явления — факт*», o — климатическая повторяемость явления, m — доля промахов ($h+m=o$), r — отношение возможных затрат и потерь потребителя (известное из экономики cost/loss-ratio). В статье [3] приводится пример оценки экономической эффективности (V) в зависимости от отношения между затратами и потерями потребителя (r) при прогнозе события «выше нормы» на высоте изобарической поверхности 500 гПа над территорией Европы и с использованием нескольких способов построения прогностических ансамблей.

B. Беспристрастные оценки

В обзорной статье [14] на знаменитом примере оценок прогнозов торнадо, проведенных в 1884 году американским сержантом Финли, обсуждаются исторические аспекты самых разных проблем верификации. Драматизм истории заключался в следующем. К 1884 году Финли собрал результаты своих прогнозов торнадо, которые ниже демонстрируются в виде таблиц сопряженности (рис. 5), и оценил их с помощью отношения $(n_{11}+n_{22})/N = (28+2680)/2803=0{,}966$.

TABLE 2. Generaldescription of 2x2 verification problem in terms of a contingency table consisting of joint and marginal frequencies.

	Observations		
Forecasts	Event 1	Event 2	
Event 1	n_{11}	n_{12}	$n_{1.}$
Event 2	n_{21}	n_{22}	$n_{2.}$
	$n_{.1}$	$n_{.2}$	$n_{..}$

TABLE 3. Representation of pooled results of Finley's experimental tornado forecasting program in terms of 2x2 contingency table consisting of joint and marginal grequencies.

	Observations		
Forecasts	Tornado	No tornado	
Tornado	28	72	100
No tornado	23	2680	2730
	51	2752	2803

Рис. 5. Таблица сопряженности, построенная по данным сержанта Финли, из статьи [13].

Book_Gidromet.indb 282 13.01.2010 13:14:37

В нашей литературе это отношение называется «общей оправдываемостью» [4]. Буквально через два месяца появилась статья Гилберта, в которой указывается ошибка сержанта, заключающаяся в использовании данных о количестве случаев «отсутствия торнадо», которое в наблюдениях оказывается намного более частым, чем «наличие торнадо». Финли оправдывал включение «нет торнадо» тем, что прогноз отсутствия столь же труден, как и прогноз наличия торнадо. Гилберт замечает, что климатологическая частота отсутствия торнадо приводит к тому, что если прогнозировать всегда это отсутствие, то получится еще более высокое качество: $(n_{12}+n_{22})/N = (72+2680)/2803= 0{,}982$!

Собственно, именно с этой статьи Гилберта началось активное обсуждение оценок качества. В течение последующих десятилетий многие из предложенных в те годы мер качества переоткрывались под новыми именами по обе стороны Атлантики. Например, в 1949 г. Палмер и Аллен, занимаясь верификацией прогнозов факта осадков, обнаружили, что в большом количестве случаев учитывают прогноз и факт отсутствия осадков. Чтобы избежать чрезмерности учета таких событий, они предложили меру, названную «оценкой опасности» (threat score), которая, кстати, стала основной в зарубежной метеорологии при оценках качества прогнозов осадков. В 1975 г. Дональдсон и коллеги, занимавшиеся прогнозом опасных явлений, предложили показатель под названием critical success index, который можно перевести как индекс «критических исходов». В 1994 г. Блэк предложил назвать меру, также введенную Гилбертом, «беспристрастной оценкой опасности» (equitable threat score). Обилие имен сопровождает знаменитую оценку Пирса, Peirce (1884), которая в отечественной литературе приобрела название «Пирси-Обухова», а в Европе стала «оценкой Хансена-Куиперса» (1965) и позже «критерием Флюкка» (1987). «Немного людей удосужилось заглянуть в работы конца 19 века…» — замечает Мерфи.

Именно от обсуждения оценок Финли в 1884—1893 гг. прослеживается история так называемых *беспристрастных*, или *объективных* (equitable) оценок качества. Кстати, в теории игр данный термин используется в словосочетании *справедливая игра*.

Прогноз осадков, как и прогноз торнадо, обладает такой особенностью, которую можно назвать перенаселенностью отдельных ячеек таблицы сопряженности. Например, в отмеченном Палмером и Алленом явлении, частые прогноз и наблюдение факта осадков приводят к перегруженности ячейки (22). В вырожденных случаях это может привести к нулям в других ячейках даже двухвходовой таблицы сопряженности!

Book_Gidromet.indb 283 13.01.2010 13:14:37

Проблема беспристрастности (или объективности) относится и к такому вопросу, как тенденция консервативного прогнозирования, когда схема предпочитает в силу разных причин какую-либо одну градацию, например, норму. Можно ли построить такие оценки, которые штрафуют консерватизм?

В статье [8] проблемы оценок категорийных прогнозов с таких позиций были рассмотрены в большой общности. Авторы отмечают, что оценки категорийных прогнозов должны взвешиваться некоторыми квадратными матрицами баллов или весов (scoring matrices). Подобные матрицы рассматривались еще в первые десятилетия XX века. Так, в 1926 г. Хайдке предложил оценку качества относительно случайного прогноза с учетом частоты точных прогнозов.

Однако матрицы весов не всегда подходят, когда ситуации «не сбалансированы», т.е. когда разные градации имеют разную климатологическую частоту. Прогнозист — если такого рода матрица задана — станет «подгонять» прогноз с учетом разнообразия частот. Такие матрицы можно назвать «необъективными», или «пристрастными» (inequitable). Примером необъективных (пристрастных) оценок качества взяты проведенные Гандиным в 1977 г. оценки качества прогнозов сумм месячных осадков по территории СССР по трем равновероятным градациям: «ниже», «норма», «выше». В частности, оценки Хайдке и Гилберта также оказываются с этой точки зрения «необъективными».

В работе [8] предложен метод построения таких «объективных оценок качества» (equitable skill scores) прогнозов категорий, которые препятствуют прогнозу какой-либо одной категории за счет других. В частности, качество прогноза одной категории и случайного прогноза получают нулевую оценку. Более того, оказалось, что построенные весовые матрицы обладают и другими полезными свойствами: 1) вес оценки правильного прогноза явления увеличивается с ростом климатологической частоты явления; 2) матрицы весов для ситуаций с n+1 категорией и с n категориями согласованы в том смысле, что первая матрица стремится ко второй при стремлении к нулю вероятности одного из явлений.

Построение матрицы весов основано на общем подходе Мерфи и Винклера [10] к оценкам качества прогнозов с помощью совместного распределения пар прогнозов и наблюдений, расположенных в категориях. Категоризация проводится для номинальных или порядковых величин. Предположим, что выделено n категорий, со-

Book_Gidromet.indb 284 13.01.2010 13:14:38

ставляющих полный набор непересекающихся событий. Совместное распределение может быть определено *характеристической n×n-*матрицей (performance matrix) $\mathbf{P} = (p_{ij})$, $p_{ij} \geq 0, \sum_{i,j} p_{ij} = 1;\ i, j = 1,...,n$, где p_{ij} — относительные частоты для случаев прогноза i-го события и наблюдения j-го события. Обозначим через $p_j = \sum_i p_{ij}$ элементы «климатологического вектора вероятностей» (climatological probability vector) j-го события, а через $q_i = \sum_j p_{ij}$ элементы «прогнозируемого вектора вероятностей» (predictive probability vector) i-го события. Эти вероятности очевидно выборочные.

Пусть далее $\mathbf{S} = (s_{ij})$ представляет «n×n-матрицу весов» (scoring matrix), которая приписывает соответствующий вес прогнозу i-го события и наблюдению j-го события. Предполагаем, что элементы данной матрицы не зависят от элементов характеристической матрицы.

Наконец, обозначим через *ESS* ожидаемую оценку качества $ESS = \sum_i \sum_j p_{ij} s_{ij}$. Делается несколько предположений о виде матрицы весов. Во-первых, симметричность, что снижает количество возможных условий до n(n+1)/2. Во-вторых, предполагается выполнение условий $ESS_i = \sum_j p_j s_{ij} = 0$ $(i = 1,...,n)$ для постоянных прогнозов и $ESS_p = \sum_j p_j s_{jj} = 1$ для идеальных прогнозов. Использование некоторых других предположений позволяет получить замкнутую систему алгебраических уравнений для нахождения элементов весовой матрицы **S,** а оценка мастерства (equitable skill score), равная $ESS = \sum_i \sum_j p_{ij} s_{ij}$, определяется как «след» произведения $\mathbf{S}^T\mathbf{P}$.

В этом же году Д. Джеррити опубликовал заметку, посвященную работе [9]. В этой заметке указывается, что элементы весовой матрицы в общем случае определяются неоднозначно и что можно дать такое определение весовой матрицы, которая бы отвечала общим требованиям «объективности». При этом проблема *n* категорий сводится к *n*-1 задачам для 2×2-матриц. Джеррити предложил замкнутую формулу для расчета весовой матрицы на основе маргинальных распределений частот в характеристической матрице **P**.

Book_Gidromet.indb 285 13.01.2010 13:14:38

Перечислим условия, которые предполагаются выполненными при расчете «показателя Джеррити» по Стандартизованной системе SVSLRF:

1) постоянный прогноз приводит к нулевой оценке: $\sum_j p_j s_{ij} = 0$;
2) случайный прогноз приводит к нулевой оценке: $\sum_{ij} q_i p_j s_{ij} = 0$;
3) идеальный прогноз приводит к единице: $\sum_j p_j s_{jj} = 1$;
4) вес для неверного прогноза не превосходит веса для точного прогноза: $s_{ij} \le s_{jj}$;
5) для учета величины погрешности предполагается, что вес ошибки в случае n+1 категорий не превосходит аналогичной ошибки в случае n категорий, что можно задать набором неравенств $s_{kj} \le s_{ij}$, если $|k-j| > |i-j|$ и $s_{jk} \le s_{ij}$, если $|i-k| > |i-j|$;
6) матрица весов предполагается симметричной.

В частности, для задачи с двумя категориями весовая матрица выглядит следующим образом: $\mathbf{S} = \begin{pmatrix} p_2/p_1 & -1 \\ -1 & p_1/p_2 \end{pmatrix}$. В частности, когда наблюдения распределены неравномерно по категориям, прогнозист получает более высокую оценку при правильном прогнозе более редкого явления. В 2×2-матрице выше видно, что если первое событие более редкое ($p_1 < p_2$), то правильный прогноз первого явления получит более высокий вес: $s_{11} = p_2/p_1 > s_{22} = p_1/p_2$.

Заключение

Как известно, выделяются три основные *цели верификации* [5]: *административная, научная* и *экономическая*. ***Администрация*** должна иметь представление о качестве прогнозов и опыте прогнозистов, чтобы планировать обучение, закупку оборудования, разработку дорогих моделей и т.д. При этом требуется небольшое, но информативное количество характеристик, применяемых к некоторым «важным» прогностическим величинам. ***Научная общественность***, часто непосредственно занятая в разработке прогностических моделей, использует оценки качества для лучшего понимания и совершенствования этих моделей. Здесь применяются разнообразные, сложные, изощренные оценки, призванные не столько выявить систематические ошибки, сколько оценить *систематическое поведение*

Book_Gidromet.indb 286 13.01.2010 13:14:39

прогностических схем. Важнейшим приложением *научного* набора статистик являются исследования предсказуемости геофизических процессов. ***Экономическая составляющая*** оценок важна, в первую очередь, для *пользователей*, хотя и администрация имеет дело с финансированием прогностической деятельности. Для пользователя показатели должны быть максимально простыми, но так как пользователей много, то количество показателей качества может быть неограниченным. При этом «хорошие» прогнозы для одного потребителя могут оказаться бесполезными, или даже «плохими» для другого. Поэтому схемы верификации, ориентированные на потребителя, должны по возможности учитывать эффективность принятия решений в разных случаях.

Представленная система оценок SVSLRF прошла довольно продолжительный этап тестирования и согласований. Первые опыты в ее внедрении оказались плодотворными и многообещающими, хотя довольно много проблем интерпретации результатов остаются невыясненными. Еще одной важной стороной стандартизации системы верификации является совместная деятельность широкой метеорологической общественности. Очевидно, что единообразие оценок и форматов позволяет значительно ускорить прогресс и в области долгосрочного прогноза погоды.

Для отечественных исследователей дополнительно возникают проблемы как усвоения новых понятий, так и грамотного перевода новой терминологии на русский язык. Здесь столь же важны взаимодействие и целенаправленные, согласованные мероприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вероятность и математическая статистика. Энциклопедия. М.: Большая Российская Энциклопедия, 1999. 910 с.
2. *Муравьев А.В., Вильфанд Р.М.* О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология, 2000, № 12. С. 24—34.
3. *Муравьев А.В., Куликова И.А.* Оценка экономической эффективности ансамблей гидродинамических прогнозов на основе вероятностных оценок качества // Метеорология и гидрология, 2004, № 11. С. 17—26.
4. Руководящий документ. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Комитет Гидрометеорологии при кабинете министров СССР. Москва 1991. РД 52.27.284—91. 150 с.
5. *Brier G.W., Allen R.A.* Verification of weather forecasts // Compendium of Meteorology (ed. T. Malone). Boston: American Meteorological Society, 1951. P. 841—848.
6. Forecast Verification. Atmospheric Science. A Practitioner's Guide. Eds. I. Jolliffe, and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2003. 240 p.

Book_Gidromet.indb 287 13.01.2010 13:14:39

7. *Fourteenth World Meteorological Congress*, Geneva, 5—24 May 2003 // Abridged Final Report with Resolutions, WMO-№ 960.
8. *Gandin L.S., Murphy A.H.* Equitable skill scores for categorical forecasts // Mon. Wea. Rev., 1992, 120, P. 361—370.
9. *Gerrity J.P.* A note on Gandin and Murphy's equitable skill score // Mon. Wea. Rev., 1992, 120. P. 2709—2712.
10. *Manual on the Global Data-processing and Forecasting System*, Volume I // Global aspects, 1992 (Supplement №. 11, November 2007).WMO-№ 485.
11. *Murphy A.H., Winkler R.L.* A general framework for forecast verification // Mon. Wea. Rev., 1987, 115. P. 1330—1338.
12. *Murphy, A.H.* Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient // *Mon. Wea. Rev.*, 1988, 16. P. 2417—2424.
13. *Murphy, A.H.* What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting // Weather Forecasting, 1993, 8. P. 28—293.
14. *Murphy A.H.* The Finley affair: a signal event in the history of forecast verification // Weather and forecasting, 1996, Vol. 11, № 1. P. 3—20.
15. *Richardson D.* Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system Quart // J. Roy. Meteor. Soc., 126, P. 649—667.
16. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) // New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485), 2002, vol. I.
17. *Stanski H.R., Wilson L.J., Burrows W.R.* Survey of common verification methods in meteorology // Research Report № 89-5, Atmospheric Environmental Service, Canada, 1989. 81 p.
18. *Stone M.* Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. // J. Roy. Statist. Soc. B, 1974, 36. P. 111—147.
19. *Swets J.A.* The Relative Operating Characteristic in Psychology. A technique for isolating effects of response bias finds wide use in the study of perception and cognition. Science, vol. 182, 4116. P. 990—1000.
20. *Swets J.A., R.M.Dawes, Monahan J.* Better decisions through science // Scientific American, 2000, 10. P. 82—87.
21. *Wilks D.* Statistical methods in atmospheric sciences: an introduction // Academic press, London. (Ch.7: Forecast verification), 1995. 465 p.

Book_Gidromet.indb 288 13.01.2010 13:14:39

Динамическая верификация численных моделей: анализ модельных механизмов генерации вертикальных движений и осадков

Н.П. Шакина, Е.Н. Скриптунова, А.Р. Иванова, И.А. Горлач
Гидрометцентр России

1. Введение

Проблемы верификации продукции численных прогностических моделей привлекают внимание как разработчиков моделей, так и потребителей. Современные численные модели характеризуются в общем высоким уровнем точности предвычисления метеорологических полей. Общепринятые характеристики ошибок прогноза (средние арифметические, средние абсолютные и среднеквадратические ошибки, коэффициенты корреляции и пр.) часто мало отличаются в различных моделях. При этом проблемы недостаточно точного прогноза ряда явлений, в особенности высокой и экстремальной интенсивности, остаются актуальными. В частности, хорошо известно, что даже в лучших прогностических моделях прогноз осадков, в особенности сильных, недостаточно успешен. Известно также, что успешность прогноза осадков определяется, с одной стороны, адекватностью модельных механизмов фазовых переходов влаги, облако- и осадкообразования, с другой — адекватностью модельных механизмов генерации вертикальных движений. Роль второго из указанных факторов нельзя недооценивать. Действительно, механизмы облако- и осадкообразования как в природе, так и в моделях, включаются лишь постольку, поскольку имеют место восходящие движения. Если последние недооцениваются моделью, то, при всем совершенстве схем облако- и осадкообразования, осадки также будут недооцениваться. Как показано в [12, 13], имеется тесная статистическая связь между наличием и интенсивностью наблюдаемых осадков, с одной стороны, и диагностическими характеристиками вынуждения вертикальных движений, с другой. Эта связь настолько хорошо выражена, что указанные характеристики являются значимыми предикторами осадков, в особенности сильных. При этом не предусматривается расчет вертикальных скоростей или сконденсировавшейся влаги: в качестве предикторов выступают величины, рассчитываемые по полям ветра, температуры и давления. Поле влажности привлекается в

Book_Gidromet.indb 289 13.01.2010 13:14:40

минимальной мере. В частности, введенный в [10, 11, 14] фронтальный параметр (F) зависит от влажности только через эквивалентную добавку к температуре в выражении для расчета характеристик бароклинности как функций от горизонтального градиента средней эквивалентной температуры слоя. Используя в качестве одного из предикторов параметр F, а в качестве второго — высоту тропопаузы либо фронтогенетическую функцию (обе эти величины совсем не зависят от влажности), удается, как показано в [13] на большом материале реальных данных, получить прогноз осадков ≥1 мм/12 ч с практически значимой успешностью (критерий Пирси PI ≈ 0,40), сравнимой с успешностью численного прогноза (см., например, [1, 2]).

Полученные в [10—14] результаты указывают на примат динамики в процессе генерации осадков в атмосфере. При этом имеется в виду не только динамика нижней тропосферы (под нижней тропосферой мы будем понимать планетарный пограничный слой) или нижней половины тропосферы, а еще и динамика мощного слоя, захватывающего тропопаузу и нижнюю стратосферу. Известно, например, что численные модели, в которых верхняя жесткая граница располагалась на тропопаузе, не обеспечивали успешного прогноза осадков [16]. Между тем, хотя этот результат хорошо известен, разработчики численных моделей и в настоящее время, стремясь улучшить модельный прогноз осадков, основное внимание уделяют совершенствованию осадкообразующих механизмов, порой не слишком заботясь о деталях динамики верхней тропосферы и нижней стратосферы. Это отчасти объясняется особенностями общепринятого подхода к задаче верификации численных моделей. Точность прогноза полей геопотенциала, температуры и ветра на всех уровнях модели, других модельных полей, таких, как осадки, обычно оценивается путем расчета ошибок прогноза каждой из этих величин, сравнивая данные объективного анализа и прогноза в узлах сетки или же данные наблюдений на станциях с данными численного прогноза. Рассчитываются средние по той или иной области значения ошибок каждого из полей; обычно у отечественных моделей ошибки несколько больше, чем у лучших моделей мирового класса, однако различия не столь велики. Такая верификация не выявляет «слабых мест» модельной динамики. Между тем, такие слабые места можно идентифицировать, а значит, и дать разработчикам полезные ориентиры для работ по совершенствованию моделей. Для этого, в добавление к стандартным процедурам расчета ошибок прогноза тех или иных метеорологических величин, целесообразно проводить расчеты

Book_Gidromet.indb 290 13.01.2010 13:14:40

динамически и физически содержательных диагностических характеристик динамики по выходным данным моделей и сравнивать их с теми же величинами, рассчитанными по реальным данным (по объективному анализу на срок прогноза). Кроме того, необходимо сравнивать также диагностические характеристики, рассчитанные по полям анализа различных моделей. В практике оперативных испытаний численных моделей их начальные поля (объективный анализ), как правило, не подвергаются изучению. На первый взгляд, поля давления, температуры, ветра, с которых стартуют различные модели, не сильно отличаются друг от друга (на поля влажности обычно обращают мало внимания). Однако, на самом деле, глубинные различия этих полей могут быть очень существенными и приводить к серьезным последствиям в качестве прогноза.

В настоящей статье на наиболее простых примерах демонстрируется эффективность предложенного подхода для оценки степени адекватности некоторых важнейших механизмов генерации вертикальных движений (а значит, и осадков) в различных глобальных моделях и в их начальных полях (анализе).

2. Использованные данные

Для расчетов диагностических характеристик модельных механизмов вынуждения вертикальных движений использовались прогностические (на 24 ч со сроков 00 и 12 ВСВ) и начальные поля давления (геопотенциала), ветра, температуры и влажности на стандартных уровнях от 1000 до 100 гПа северного полушария следующих глобальных численных моделей атмосферы:

– полулагранжева конечно-разностная модель (ПЛМ), разработанная совместно Институтом вычислительной математики (ИВМ) РАН и Гидрометцентром России; оперативно работает в Гидрометцентре, результаты записываются в базу данных на сетках 1,25x1,25° и 0,9x0,72°; кроме того, работает версия с переменным разрешением, выходные данные которой доступны на сетке 0,56x0,26°;

– спектральная модель (СМ) Гидрометцентра России в оперативной конфигурации T85L31; прогностические поля записываются в базу данных на сетке 1,25x1,25°;

– модель Национального центра прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP) США, данные которой поступают в Гидрометцентр России в оперативном режиме с сентября 2006 г. на сетке 1x1°;

Book_Gidromet.indb 291 13.01.2010 13:14:40

– модель Метеорологической службы Великобритании (UKMO), данные которой в оперативном режиме регулярно поступают в Гидрометцентр России на сетке 2,5x2,5° и (не в полном объеме) 1,25x1,25°.

Укажем некоторые особенности используемых моделей. Сравнительно недавно внедренная в практику полулагранжева модель успешно прошла оперативные испытания по прогнозу ряда метеорологических полей, включая осадки, и показала результаты, по ряду позиций превосходящие другие численные модели, работающие в Гидрометцентре России (подробнее об этом см. п. 3). Спектральная модель в указанной выше конфигурации работает в Гидрометцентре России с 2001 г. и к настоящему времени в значительной мере исчерпала свои ресурсы. Уже в текущем году планируется ее замена новой версией с более высоким пространственным разрешением (T169L31). Результаты этой последней с недавнего времени доступны в оперативном режиме, однако за те периоды, которые рассмотрены в данной статье, мы еще не располагали ее данными. (Отметим, что объективный анализ, с которого стартует СМ, отличается от оперативного объективного анализа Гидрометцентра России.) Модели NCEP и UKMO, как модели мирового класса, в настоящее время в общем (хотя и не по всем позициям) превосходят отечественные модели, являясь в известной мере эталонными. Из них наиболее совершенной считается модель UKMO.

Для всех перечисленных моделей заархивированы начальные и прогностические (на 24 ч) поля за сроки 00 и 12 ВСВ по северному полушарию по четырем декадам (1—10 числа центральных месяцев сезонов: января, апреля, июля и октября) в 2007 г., а также за зимнюю декаду 2008 г. Примеры расчетов, за недостатком места, приводятся в основном по октябрьской 2007 г. декаде и только частично — по остальным декадам. Результаты сравнения полей диагностик даются в статье преимущественно не по всему полушарию, а по территориям России и ее европейской части, поскольку именно по этим областям имеются данные оперативных испытаний численных прогнозов осадков.

3. Сравнительная точность модельных прогнозов осадков

Остановимся вкратце на некоторых результатах проводившихся в Гидрометцентре России оперативных испытаний численных прогнозов осадков холодного (октябрь 2006 — апрель 2007 гг.) и теплого (июль — сентябрь 2006 г., май — июнь 2007 г.) периодов. По методике, принятой

Book_Gidromet.indb 292 13.01.2010 13:14:41

в Гидрометцентре России [6], оценивалась, во-первых, успешность прогноза факта выпадения осадков (их наличия или отсутствия) и, во-вторых, успешность прогноза их интенсивности (полусуточных сумм осадков) по градациям, предусмотренным в [5]. Не вдаваясь в детали оценок осадков по интенсивности (в этой связи представляет интерес сборник [21]), отметим следующие результаты. В целом, численный прогноз факта осадков следует считать вполне успешным по всем моделям (таблица 1). Действительно, прогноз считается лучшим, чем случайный при значениях критерия Пирси PI > 0,25 и практически значимым при PI > 0,30, в таблице же представлены преимущественно PI > 0,40 или PI > 0,50, с максимумом 0,63 для модели UKMO по Восточной Сибири и Дальнему Востоку. В теплый период PI в общем меньше, чем в холодный, кроме модели NCEP. Уровень успешности моделей UKMO и NCEP почти одинаков (с некоторым преимуществом у модели NCEP). ПЛМ не уступает им в холодный период, но в теплый — существенно отстает. Версия T85L31 спектральной модели сильно уступает другим моделям, особенно в теплый период.

Приведенные результаты показывают значительный прогресс в численном моделировании осадков, в сравнении с недавними оцен-

Таблица 1

Критерии Пирси (PI) как характеристики успешности прогноза факта осадков на 24 ч в холодный и теплый периоды года по регионам

Регион	Холодный период				Теплый период			
	ПЛМ	СМ	NCEP	UKMO	ПЛМ	СМ	NCEP	UKMO
Центр и север ЕТР	0,53	0,46	0,41	0,44	0,45	0,30	0,52	0,52
Юг ЕТР	0,55	0,42	0,58	0,49	0,54	0,24	0,57	0,53
Зарубежная Европа	0,51	0,46	0,61	0,53	0,46	0,45	0,58	0,56
Западная Сибирь	0,54	0,49	0,51	0,56	0,40	0,39	0,53	0,56
Восточная Сибирь и Дальний Восток	0,53	0,49	0,61	0,63	0,50	0,42	0,57	0,50
Среднее	0,53	0,46	0,54	0,53	0,47	0,36	0,55	0,52

Book_Gidromet.indb 293 13.01.2010 13:14:41

ками [1, 2], не говоря уже о более ранних результатах. Тем не менее, в особенности когда речь идет об интенсивных осадках, с точки зрения потребностей практики, достигнутая точность представляется недостаточной даже в лучших, эталонных моделях. (Мы здесь не касаемся таких характеристик, как время начала и окончания дождя, временной ход интенсивности и др.).

Не останавливаясь на деталях, отметим, что доля прогнозов наличия осадков (от общего числа прогнозов) минимальна в спектральной модели; в полулагранжевой модели она заметно больше, чем в СМ, хотя и меньше, чем в моделях UKMO и NCEP (в которых эти доли приблизительно одинаковы). Таким образом, в спектральной модели осадки (по крайней мере в прогнозе на сутки) генерируются в меньшем числе узлов, чем в полулагранжевой модели и тем более — чем в двух моделях мирового класса. Но при этом в спектральной модели осадки более интенсивны, в особенности в теплый период. В ПЛМ повторяемость прогнозов осадков теплого периода, в особенности сильных, занижена, чем и объясняются более низкие, чем в холодный период, показатели успешности этой модели в таблице 1.

Причинами таких расхождений могут быть особенности модельной динамики, эффекты которой и являются основным предметом исследования настоящей статьи. С другой стороны, могут сказываться и такие более очевидные причины, как расхождения в начальных полях.

4. Характеристики бароклинности в нижней половине тропосферы

Продемонстрируем возможности выявления «слабых мест» моделей на примере простейших характеристик бароклинности в модельных и реальных данных.

Бароклинность, или горизонтальные контрасты температуры — основная характеристика динамики атмосферы средних широт. Высотные фронтальные зоны в тропосфере и зоны атмосферных фронтов у земли — это области высокой бароклинности, с которыми связаны важнейшие погодообразующие процессы синоптического масштаба, такие как циклогенез и фронтогенез. Адекватность модельного описания бароклинных зон в значительной степени определяет правильность воспроизведения указанных процессов.

Очевидно, что средние по области ошибки прогноза температуры недостаточны для оценки точности моделирования бароклинных

Book_Gidromet.indb 294 13.01.2010 13:14:42

зон. В работах, посвященных задаче объективного выделения зон атмосферных фронтов [11, 20], для оценки бароклинности используются величины, характеризующие неоднородность полей температуры или эквивалентной температуры (поскольку из опыта известно, что свойства фронтов определяются контрастами не только температуры, но и влажности воздушных масс). В качестве примера приведем результаты верификации достаточно простой величины — модуля горизонтального градиента так называемой эквивалентной толщины *ZTE* слоя между изобарическими поверхностями 500 и 850 гПа:

$$|\text{grad } ZTE| = |\text{grad}(-\sum_{850}^{500} \frac{R}{g} \overline{T_e} \ln \frac{p_u}{p_l})|,$$

где T_e — эквивалентная температура (T — температура в К, L — теплота парообразования, q — массовая доля влаги, c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении, p_l и p_u — давление на нижнем и верхнем уровнях при послойном расчете суммы):

$$T_e = T + L \cdot q / c_p,$$

а $\overline{T_e}$ определяется следующим выражением:

$$\overline{T_e} = (T_{e,u} - T_{e,l}) / \ln(T_{e,u} / T_{e,l}).$$

Влажность входит в *ZTE* через эквивалентную добавку $L \cdot q / c_p$ к температуре. Поля T_e являются достаточно гладкими, однако в областях больших контрастов влажности градиенты *ZTE* заметно больше градиентов средней температуры T слоя.

Величина |grad *ZTE*| является одним из основных предикторов для расчета фронтального параметра F [11] по данным о температуре, ветре и геопотенциальных высотах поверхностей 850, 700 и 500 гПа, а также о приземном давлении. Влажность, как было сказано, привлекается только для расчета эквивалентной добавки.

В таблице 2 приведены для европейского региона повторяемости значений |grad *ZTE*| и фронтального параметра F по градациям, рассчитанные по полям анализа и прогноза моделей UKMO, ПЛМ и СМ на сетке с шагом 2,5 и 1,25°. Расчеты по модели NCEP в таблице 2 не приводятся из-за различия в шагах сетки: расчет F и |grad ZTE| включает дифференцирование по горизонтальным координатам, и различие в шагах сетки делает результаты не вполне сопоставимыми.

Из таблицы видно, прежде всего, что количество узлов сетки со слабой бароклинностью в прогнозе отечественных моделей больше, чем в

Book_Gidromet.indb 295 13.01.2010 13:14:42

анализе (в модели UKMO они совпадают); далее, число узлов с высокой бароклинностью в прогнозе СМ выше, чем в анализе, а в двух других моделях эти числа мало различаются. Наиболее заметным результатом из приведенных в таблице 2 является то, что число узлов с высокой бароклинностью в анализе СМ на сетке с шагом 2,5° в полтора раза меньше, чем в других моделях. Эти соотношения сохраняются и при шаге 1,25°.

В общем, то же относится и к результатам расчета фронтального параметра: процент узлов с F ≥ 60 в анализе СМ почти вдвое меньше, чем в ПЛМ и в модели UKMO. Различия между анализом и прогнозом каждой из моделей оказываются намного меньшими, чем различия между анализами (и прогнозами) моделей UKMO и СМ. Что касается ПЛМ, то ее анализ и прогноз достаточно близки к модели UKMO.

Таким образом, сравнение результатов расчета основных характеристик бароклинности и циклоничности (|grad *ZTE*| и F) обнаружи-

Таблица 2

Процент узлов сетки анализа (А) и прогноза на 24 ч (П) по СМ, ПЛМ и модели UKMO, в которых F < 20 (внутримассовые условия), F ≥ 60 (интенсивные фронты), |grad ZTE| < 20 дам/5° (низкая бароклинность), |grad ZTE| ≥ 70 дам/5° (высокая бароклинность) при шагах сетки 2,5 и 1,25° по северному полушарию, октябрь 2007 г.

		СМ		ПЛМ		UKMO
		2,5°	1,25°	2,5°	1,25°	2,5°
Внутримассовые условия	А	68,2	65,4	63,9	58,8	63,7
	П	65,8	63,6	63,6	58,4	64,9
Интенсивные фронты	А	7,7	10,5	15,5	22,1	14,6
	П	9,7	12,5	16,4	22,2	15,0
Низкая бароклинность	А	30,1	28,8	28,8	26,6	27,5
	П	35,0	32,7	29,6	28,5	27,5
Высокая бароклинность	А	10,5	11,7	17,3	20,6	17,1
	П	12,4	13,6	17,0	20,2	17,6

Примечание.
Горизонтальный градиент потенциальной температуры |grad ZTE| имеет размерность декаметров на 5° географической сетки.

Book_Gidromet.indb 296 13.01.2010 13:14:42

вает бо'льшие различия в анализах моделей, хорошо заметные при обоих шагах сетки. В полях анализа СМ обе эти характеристики так сильно сглажены, что, хотя динамика модели стремится генерировать больше интенсивных фронтальных зон (узлов с $F \geq 60$ на 20% больше в прогнозе, чем в анализе) — их все-таки намного меньше, чем в моделях UKMO и в ПЛМ.

Обратим внимание, что этот результат не мог быть получен путем сравнения диагностик в среднем по полю. Он получен путем выделения физически наиболее значимых интервалов значений диагностик (соответствующих условиям однородных воздушных масс и фронтальных бароклинных зон).

В этой связи охарактеризуем вкратце (таблица не приводится) результаты расчета простейшей характеристики фронтогенеза — скалярной фронтогенетической функции FG, равной индивидуальной производной по времени от модуля горизонтального градиента температуры [8]. Ограничимся только случаями фронтогенеза, т.е. положительных значений FG, превышающих уровень шумов, на поверхности 850 гПа, рассчитанными по сетке с шагом 2,5° (с тем, чтобы получить сравнимые результаты по модели UKMO и отечественным моделям). Больше всего случаев интенсивного фронтогенеза в модели UKMO: их доля, практически одинаковая в анализе и прогнозе, в полтора раза больше, чем в анализе СМ. Прогностическая схема СМ стремится генерировать фронтогенез (в особенности сильный), так что он значительно чаще встречается в прогнозе по этой модели, чем в анализе. В прогнозе ПЛМ, напротив, случаев фронтогенеза на 20—25% меньше, чем в анализе. Таким образом, фронтогенетические и фронтолитические эффекты (определяемые нелинейным взаимодействием полей ветра и температуры) на уровне 850 гПа в отечественных моделях ослаблены, причем в СМ — уже на стадии анализа. Естественно, это ведет к недооценке бароклинности в соответствующем слое, а значит и к недооценке вертикальных движений, которые, как известно, развиваются в зонах фронтогенеза и фронтолиза.

5. Эффекты глубоких вертикальных циркуляций

Процессы фронтогенеза и фронтолиза, происходящие в толще тропосферы, обусловливают развитие поперечных к бароклинным зонам вертикальных циркуляций в глубоких слоях, захватывающих нередко не только тропосферу, но и нижнюю стратосферу [8, 16]. Эти циркуляции проявляются и в полях таких измеряемых и наиболее

Book_Gidromet.indb 297 13.01.2010 13:14:43

точно прогнозируемых величин, как температура и ветер. В частности, струйные течения (СТ) в верхней тропосфере и характерные для СТ спиральные поперечные циркуляции являются частью таких систем вертикальных движений. Еще одним ярким проявлением последних являются процессы деформации тропопаузы — формирование ее складок и воронок на холодной стороне струйных течений; в понижениях тропопаузы стратосферный воздух опускается глубоко на тропосферные уровни, иногда достигая подстилающей поверхности; на теплой стороне СТ восходящие ветви циркуляционных ячеек образуют «купола» высокой тропопаузы. Поэтому оценки точности модельного прогноза струйных течений и топографии тропопаузы могут в определенной степени служить критериями адекватности модельного механизма формирования поперечных циркуляций во фронтальных зонах: если, например, скорости ветра в СТ и деформация тропопаузы недооцениваются, то это указывает на недооценку вертикальных движений в тропосфере и нижней стратосфере.

Обратимся к результатам верификации прогноза скоростей СТ по данным, охарактеризованным в п. 2. Скорости ветра на осях СТ, или так называемые скорости максимального ветра (МВ) в тропосфере, были рассчитаны по данным объективных анализов, с которых стартовали модели, и по данным прогноза на 24 ч во всех точках соответствующих сеток на северном полушарии. Следуя методике [3], оперативно используемой в Гидрометцентре России и не отличающейся принципиально от соответствующих методик, принятых в мировых прогностических центрах, расчет МВ выполнялся путем аппроксимации непрерывного профиля скорости ветра в каждом узле сетки с помощью кубических сплайнов по вертикальной координате и затем нахождения на построенном профиле максимума скорости.

В таблице 3 приведены средние арифметические (δ) ошибки прогностических скоростей МВ, рассчитанных по полям ветра четырех глобальных моделей. Ошибкой считается разность скоростей МВ в данном узле сетки, рассчитанных по прогностическому полю ветра и по анализу ветра на срок прогноза. Из таблицы видно, что ошибки прогноза скоростей ветра вне зон СТ, т.е. скоростей <30 м/с, во всех моделях невелики, что при стандартных оценках обеспечивает хорошие показатели в среднем по всему полю (величины δ в колонке «средние»). Систематические ошибки δ в моделях UKMO и NCEP пренебрежимы, а в отечественных моделях обнаруживается занижение скоростей МВ тем более сильное, чем больше сами скорости. При существенном занижении скоростей МВ теряются малоинтенсивные

Book_Gidromet.indb 298 13.01.2010 13:14:43

Таблица 3

Средние арифметические ошибки (δ, м/с) прогноза на 24 ч скорости максимального ветра и процент (%) от общего числа узлов сетки, в котором скорость максимального ветра лежит в данном диапазоне по данным анализа (А) и прогноза (П) различных моделей. Северное полушарие, октябрь 2007 г. и январь 2008 г.

		Скорость максимального ветра, м/с						Среднее
		<30	30—40	40—50	50—60	≥60	≥30	
Январь 2008 г.								
СМ	δ	–0,5	–1,9	–2,9	–4,4	–6,6	–3,1	–1,6
	%, А	57,7	19,6	11,3	6,3	5,1	42,3	–
	%, П	61,3	19,6	10,4	5,5	3,2	38,7	–
ПЛМ	δ	–0,4	–0,8	–1,1	–1,9	–3,8	–1,4	–0,8
	%, А	57,1	20,4	11,6	6,0	4,9	42,9	–
	%, П	58,8	19,6	11,5	6,0	4,1	41,2	–
NCEP	δ	0,1	–0,1	–0,2	–0,3	–0,8	–0,3	–0,1
	%, А	59,8	18,1	9,9	6,5	5,7	40,2	–
	%, П	59,9	18,1	9,8	6,4	5,7	40,1	–
UKMO	δ	0,7	0,8	1,0	1,2	1,6	1,0	0,8
	%, А	49,7	22,6	14,2	8,1	5,4	50,3	–
	%, П	47,8	22,9	14,4	8,6	6,3	52,2	–
Октябрь 2007 г.								
СМ	δ	–0,2	–2,9	–4,2	–5,6	–6,4	–3,8	–1,0
	%, А	77,2	12,3	6,1	2,9	1,5	22,8	–
	%, П	80,5	11,5	5,1	2,0	0,9	19,5	–
ПЛМ	δ	–0,6	–2,3	–3,2	–4,2	–4,9	–2,9	–1,2
	%, А	77,1	12,4	6,1	2,9	1,5	22,9	–
NCEP	δ	0,1	–0,2	–0,3	–0,6	–1,1	–0,3	0,0
	%, А	75,9	12,5	6,5	3,2	1,9	21,1	–
	%, П	75,7	12,7	6,5	3,2	1,9	24,3	–
UKMO	δ	0,6	1,0	1,1	1,0	0,8	1,0	0,7
	%, А	76,4	12,5	6,2	3,1	1,8	23,6	–
	%, П	74,6	13,1	6,6	3,5	2,1	25,4	–

Book_Gidromet.indb 299 13.01.2010 13:14:43

СТ, а горизонтальные и вертикальные размеры сохранившихся СТ занижаются. Это важно и с практической точки зрения, поскольку прогноз струйных течений и максимального ветра является существенной частью авиационного прогноза по маршруту полета. Ослабленным СТ соответствуют и более слабые вертикальные движения, что отразится и на модельном прогнозе облаков и осадков.

Обратимся теперь к анализу топографии тропопаузы, которую будем определять через потенциальный вихрь Эртеля:

$$PV = -g\,(\partial v/\partial x - \partial u/\partial y + f)\,\partial\Theta/\partial p,$$

где g — ускорение силы тяжести, p — давление, u, v — составляющие скорости ветра по осям x, y соответственно, $f = 2\omega\sin\varphi$ — параметр Кориолиса (ω — угловая скорость вращения Земли, φ — широта), Θ — потенциальная температура.

В предположении алиабатичности, PV является инвариантом системы примитивных уравнений [8]. На этом основании вне пограничного слоя, а тем более в верхней тропосфере и нижней стратосфере PV можно считать консервативной характеристикой индивидуальной частицы. В свободной тропосфере поле PV характеризуется сравнительной однородностью значений (PV < 1 pvu, где pvu=10^{-6} К. кг$^{-1}$с$^{-1}$ — принятая единица измерения PV), тогда как для стратосферы характерны на порядок большие значения PV. В переходном слое тропопаузы PV меняется от 1 до 5 pvu [19], так что PV = 1—3 pvu считаются характерными для субстратосферного воздуха переходного слоя, значения PV = 3—4 pvu наиболее близко соответствуют тропопаузе, определяемой по профилю температуры согласно критерию ВМО [17], как это показано в работах [9, 19] на большом объеме данных по всему земному шару.

Топография изоповерхностей PV, соответствующих слою тропопаузы, является, как было сказано выше, индикатором вертикальных циркуляций в мощных слоях тропосферы и нижней стратосферы. Чтобы оценить успешность описания таких циркуляций численными моделями, очевидно, необходимо сравнить топографию соответствующих изоповерхностей PV в диагнозе и прогнозе. Такие расчеты выполнены для PV = 4 pvu на указанном в п. 2 материале диагностических, или начальных, а также прогностических полей температуры, ветра и геопотенциала. Потенциальный вихрь PV рассчитывался с использованием ранее разработанной схемы [9], используемой в Гидрометцентре России для оперативной и исследовательской работы. Схема основана на аппроксимации зависимостей составляю-

Book_Gidromet.indb 300 13.01.2010 13:14:44

Таблица 4

Средние арифметические ошибки (δ, гПа) прогноза высоты динамической тропопаузы (PV=4 pvu) и процент (%) от числа узлов сетки, в котором тропопауза лежит в данном диапазоне давления (гПа) в анализе (А) и прогнозе (П) различных моделей. Северное полушарие, октябрь 2007 г. и январь 2008 г.

Модель	Шаг сетки		Диапазон давления, гПа								Среднее
			>400	400–350	350–300	300–250	250–200	200–150	150–100	≤100	
Январь 2008 г.											
СМ	1,25	δ	–55,0	–24,3	–10,1	–4,0	–1,3	3,4	0,4	–0,3	–2,9
		%, А	0,2	2,7	11,5	23,3	18,9	6,5	14,1	22,8	–
		%, П	0,0	1,6	11,2	23,1	20,7	6,9	12,9	23,6	–
ПЛМ	1,25	δ	–12,8	11,0	–6,7	–1,9	–0,1	3,7	–0,5	2,3	–0,9
		%, А	0,2	3,0	11,1	20,9	20,7	6,2	18,4	19,3	–
		%, П	0,2	2,7	11,1	20,6	21,3	6,6	17,4	20,1	–
NCEP	1,0	δ	–22,6	–10,0	–5,0	–2,5	–1,7	–0,1	7,5	3,4	–0,7
		%, А	0,5	3,8	13,6	21,6	17,4	9,0	4,5	29,6	–
		%, П	0,6	3,3	13,3	21,7	18,0	9,2	4,3	29,6	–
UKMO	2,5	δ	–16,8	–2,4	–0,3	1,1	0,7	3,4	1,6	0,9	0,8
		%, А	0,4	3,7	13,3	21,2	17,4	4,9	18,0	21,1	–
		%, П	0,4	4,0	13,6	21,1	17,1	4,6	17,7	21,3	–
Октябрь 2007 г.											
СМ	1,25	δ	–60,0	–26,6	–7,4	–2,6	–0,7	4,2	–1,8	0,7	–1,9
		%, А	0,1	1,6	9,8	22,1	13,4	8,8	26,8	17,4	–
		%, П	0,0	0,9	9,7	22,4	14,6	8,2	25,3	18,9	–
ПЛМ	1,25	δ	–17,5	–12,2	–4,1	–1,0	–1,4	3,9	–0,5	3,1	–0,6
		%, А	0,1	2,4	11,5	19,1	13,7	7,9	30,5	14,8	–
NCEP	1,0	δ	–27,3	–9,5	–6,7	–2,9	–0,6	–0,3	–1,1	2,6	–1,1
		%, А	0,3	3,6	10,7	19,5	12,4	12,7	9,8	31,0	–
		%, П	0,3	3,0	10,0	19,9	13,2	13,0	9,7	30,9	–
UKMO	2,5	δ	–30,4	–4,6	0,8	2,9	1,7	4,6	0,4	1,9	1,4
		%, А	0,4	3,5	10,7	20,0	12,5	7,4	29,8	15,8	–
		%, П	0,4	3,6	11,4	19,5	12,4	7,3	29,8	15,6	–

Book_Gidromet.indb 301 13.01.2010 13:14:44

щих скорости ветра от горизонтальных координат в выражении для относительной завихренности в (1) через бикубические сплайны и аппроксимации вертикальных профилей $\Theta(p)$ и $PV(p)$ кубическими сплайнами, после чего находится высота уровня PV = 4 pvu.

Результаты верификации представлены в таблице 4, где ошибки δ даны по интервалам высот тропопаузы. Как и следовало ожидать, наибольшие ошибки относятся к воронкам тропопаузы (что соответствует давлению >400 гПа), доля которых в общем объеме выборки невелика (менее 1% от общего числа узлов сетки, которое при шаге 2,5° для одной 10-дневной серии равно 117 300). В среднем по всему полю ошибки невелики и не столь сильно различаются в разных моделях (δ от 1,4 до –2,9 гПа), но они не показательны для характеристики точности моделирования глубоких воронок и куполов тропопаузы. Из таблицы видно, что величины δ отрицательны при низкой тропопаузе и положительны при высокой: это опять-таки означает сглаживание экстремумов высоты тропопаузы в прогнозе. Недооценка глубины воронок (<400 гПа) заметна даже в лучших моделях. Интересно напомнить в этой связи успешный опыт [15, 18] по оперативному уточнению глубин воронок тропопаузы в начальных полях по спутниковым данным с целью повышения успешности прогноза осадков. (Для этой цели использовались спутниковые измерения в полосе пропускания водяного пара).

6. Конвективная неустойчивость сеточного масштаба

Количество модельных конвективных осадков зависит, помимо конкретных особенностей схем параметризации конвекции (эффективность которых здесь не обсуждается), от запасов энергии конвективной неустойчивости, генерируемых в модели при численном прогнозе, и от ее запасов в начальном поле модели. При сравнении моделей целесообразно оценивать эти запасы с помощью простых диагностических характеристик, таких как уровень конденсации и уровень нулевой (нейтральной) плавучести (LNB), интерпретируемые соответственно как нижняя и верхняя границы конвективных облаков. Важно, что, в отличие от диагностик, рассмотренных в пп. 4—5, характеристики конвекции сильно зависят от влажности, поля которой, как известно, наблюдаются и прогнозируются со значительно меньшей точностью, чем поля давления, ветра и температуры.

Расчеты уровня конденсации и LNB проводятся путем численной реализации построения кривой состояния адиабатически подни-

Book_Gidromet.indb 302 13.01.2010 13:14:45

мающейся частицы на аэрологической диаграмме. Существует некоторое количество вариантов алгоритмов таких построений. Для целей верификации моделей не столь важно, какой из вариантов будет использован, лишь бы он был одним и тем же для всех моделей и всех объективных анализов. В данной статье анализируются результаты, полученные с помощью программы, разработанной в [7] и используемой оперативно в Гидрометцентре России для авиационного прогноза конвекции. Программа реализует классический метод частицы в его варианте, представленном в [6] и учитывающем тот факт, что развитию конвективных облаков предшествует процесс прогрева нижнего слоя воздуха путем турбулентного переноса тепла от подстилающей поверхности, в результате чего образуется сухо-адиабатически стратифицированный слой перемешивания. В программе использованы средние по месяцам толщины слоев перемешивания, определенные по большому материалу наблюдений на европейской части СССР [6].

Оценим различия повторяемостей высот уровня нулевой плавучести, рассчитанных по начальным полям различных моделей и по их выходным данным (таблица 5). По обеим областям (Россия и

Таблица 5

Повторяемость (%) конвективной неустойчивости сеточного масштаба (LNB > 2 км) в анализе (А) и прогнозе на 24 ч (П) различных моделей, 2007 г.

Модель	Шаг сетки град	Апрель		Июль		Октябрь		Число узлов сетки
		А	П	А	П	А	П	
Россия								
СМ	1,25	33,5	27,7	41,6	46,3	38,2	43,7	93060
ПЛМ	1,25	15,0	16,2	22,3	27,7	17,3	21,0	93060
NCEP	1,0	19,8	19,7	25,5	21,5	22,7	21,7	144320
UKMO	2,5	20,9	10,8	28,4	17,6	24,8	20,5	24140
Европейская часть России								
СМ	1,25	58,5	49,9	44,0	49,6	38,1	45,9	19140
ПЛМ	1,25	28,0	30,3	24,8	31,2	13,2	20,2	19140
NCEP	1,0	35,5	37,5	28,4	27,5	23,6	22,1	29520
UKMO	2,5	36,1	22,7	31,4	23,9	23,4	20,0	5100

Book_Gidromet.indb 303 13.01.2010 13:14:45

ее европейская территория) и во все сезоны (кроме зимы, которая не рассматривалась из-за очень низкой повторяемости конвекции) повторяемости LNB >2 км в начальных и прогностических полях моделей довольно сильно различаются. Эти различия минимальны в

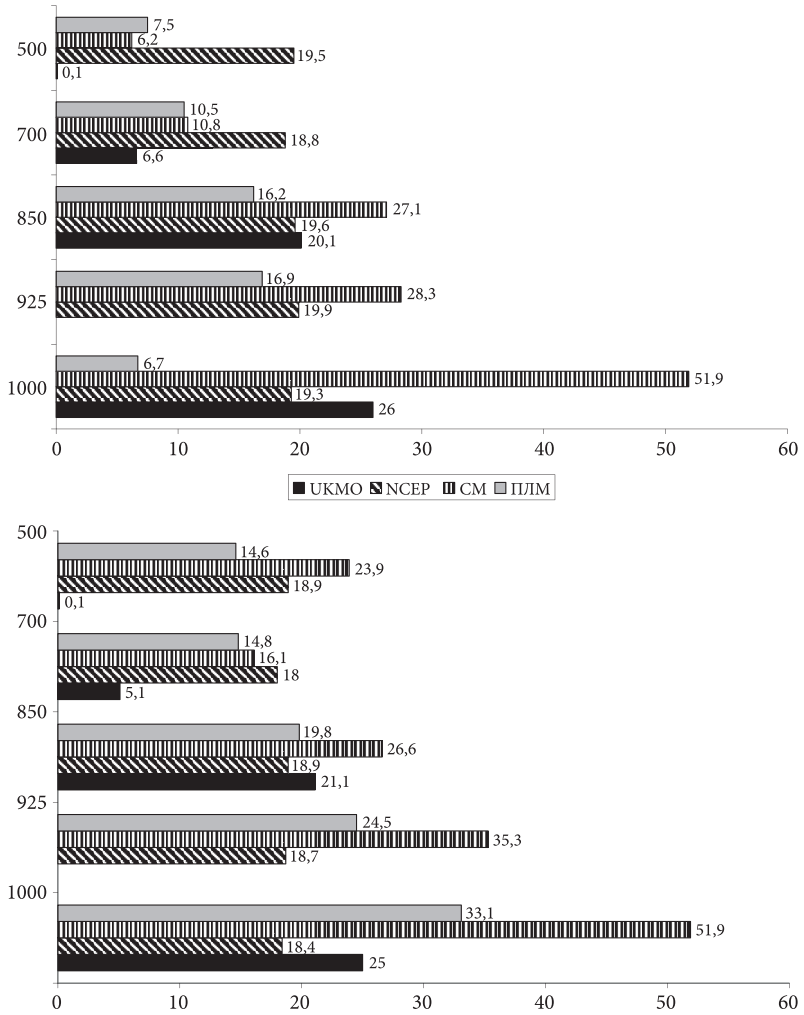


Рис. 1. Распределение повторяемости (%) градации относительной влажности 90—100% в моделях UKMO, NCEP, СМ и ПЛМ на разных уровнях (вверху — анализ, внизу — прогноз на 24 ч).

Book_Gidromet.indb 304 13.01.2010 13:14:46

модели NCEP, заметно больше в ПЛМ и наибольшие в модели UKMO и в спектральной модели.

Обращает на себя внимание то, что различия между повторяемостями LNB > 2 км в начальных полях различных моделей существенно больше, чем между начальными и прогностическими повторяемостями в одной и той же модели. Так, разница в повторяемостях LNB > 2 км между начальными полями ПЛМ и СМ достигает 20—30% (с максимумом 30,5% в апреле по ЕТР). При такой разнице в начальных данных неудивительно, что прогнозы конвективных осадков по различным моделям сильно различаются.

Приведем в этой связи некоторые данные о полях влажности в анализе и прогнозе различных глобальных моделей. На рис. 1 представлена доля узлов сетки (процент от общего числа узлов на области), в которых относительная влажность RH превышает 90% в полях анализа (начальных данных) и прогноза.

Можно видеть, что начальные поля ПЛМ являются самыми «сухими» (далекими от насыщения). Но в прогностических полях модели доля узлов с RH ≥ 90% возрастает. Наиболее «влажными» оказываются, как и следовало ожидать, начальные поля СМ и в еще большей степени – ее прогностические поля: на уровне 1000 гПа доля узлов с RH ≥ 90% составляет 46,6 и 51,9% в анализе и прогнозе соответственно, на уровне 925 гПа — 28,3 и 35,3%. Модели UKMO и NCEP демонстрируют высокую степень согласия диагноза и прогноза; процент узлов с RH ≥ 90% в начальных данных на нижнем уровне в 3—4 раза выше, чем в ПЛМ, и в 2—2,5 раза ниже, чем в СМ. Между собой обе модели мирового класса обнаруживают определенные различия, минимальные на нижнем уровне и возрастающие с высотой, в соответствии с граничными условиями моделей (анализ их не входит в задачи статьи). Поскольку решающую роль в развитии конвективной неустойчивости играет стратификация нижней тропосферы, становится понятным приведенный выше результат о более высокой повторяемости конвективной неустойчивости в СМ, по сравнению с другими моделями.

В тех случаях, когда наличие неустойчивости предсказано правильно, представляет интерес степень согласия значений диагностических и прогностических LNB. Сравнивая распределения повторяемостей различных диапазонов высот LNB в начальных и прогностических полях глобальных моделей (таблица не приводится), обнаруживаем различия, которые не выходят за пределы «удовлетворительного согласия». Значительно более важными с точки зрения прогноза конвективных осадков представляются различия в начальных полях

Book_Gidromet.indb 305 13.01.2010 13:14:46

влажности. На основании их анализа можно заключить, что при условии сравнимой интенсивности вынуждающих механизмов в ПЛМ должно генерироваться намного меньше конвективных осадков, чем в остальных моделях, а в СМ — намного больше. Однако указанное условие в моделях не соблюдается, и результат оказывается более сложным: осадки теплого периода в СМ генерируются в меньшем (в 2—3 раза, в зависимости от региона) числе узлов, чем даже в ПЛМ, но они более интенсивны. Этот результат следует оценивать с учетом вывода п. 4 о сильной сглаженности характеристик бароклинности в спектральной модели.

7. Обсуждение результатов

Используемая система диагностик, включающая характеристики бароклинности в нижней половине тропосферы, глубоких вертикальных циркуляций и запасов энергии конвективной неустойчивости сеточного масштаба, позволяет характеризовать в основных чертах особенности полей анализа и прогностических полей рассматриваемых глобальных моделей. Основной целью рассмотрения, помимо общей оценки адекватности и интенсивности модельных вынуждающих механизмов, было объяснение следующих фактов, обнаруженных в процессе испытаний успешности прогноза осадков: 1) хотя все модели достаточно эффективно предсказывают факт осадков (см. табл. 1), ПЛМ менее успешно прогнозирует летние осадки, чем зимние; 2) хотя СМ способна прогнозировать интенсивные летние осадки, но доля прогнозов наличия осадков в этой модели минимальна в сравнении с другими.

Поставленные задачи решались путем сравнения диагностических характеристик, рассчитанных по модельным анализам на срок прогноза и по прогностическим полям. Сравнивались также диагностики, рассчитанные по объективным анализам различных моделей. Очевидно, что во втором случае оцениваются различия начальных состояний, задаваемых в конкретных моделях, тогда как в первом случае оценивается способность модели воспроизводить те «фактические» состояния, которые представлены принятой в модели схемой объективного анализа. Очевидно также, что эти два типа сравнений позволяют выявить два типа ошибок, один из которых обусловлен особенностями схем ОА, другой — особенностями прогностических схем. (Уместно напомнить, что понятие «модель» включает, помимо системы уравнений, также начальные и граничные условия). Стан-

Book_Gidromet.indb 306 13.01.2010 13:14:47

дартная процедура оценки качества прогноза не позволяет разделить эти два источника ошибок.

Суммируем отмеченные в пп. 3—6 особенности распределений значений диагностик в полях анализа и прогноза сравниваемых моделей.

Остановимся вначале на моделях UKMO и NCEP. Они характеризуются общим высоким уровнем согласия диагностических и прогностических полей. Если говорить о прогнозе конвективной неустойчивости, струйных течений и максимального ветра, то в модели NCEP уровень согласия анализа с прогнозом даже выше, чем в модели UKMO. Так, в последней процент сильных струй в прогнозе несколько выше, чем в анализе, а повторяемость LNB > 2 км в прогностических полях заметно ниже, чем в анализе. Если же сравнивать анализы моделей UKMO и NCEP, то в первом из них повторяемость струйных течений на 10% выше, чем во втором, в основном за счет слабых, а не сильных струй, а во втором несколько выше доля мелкой конвективной неустойчивости. Переходя к анализу полей относительной влажности, можно снова отметить отличное согласие анализа с прогнозом (при различном распределении RH по высоте) и малые (порядка процентов) различия в RH между двумя моделями в нижней тропосфере. Запасы энергии неустойчивости в анализах моделей различаются очень мало, так же как и характеристики бароклинного вынуждения. Это обеспечивает практически одинаково высокую степень реализации конвективной неустойчивости, а следовательно, и успешность прогноза осадков как в холодный, так и в теплый периоды года.

В полулагранжевой глобальной модели с постоянным разрешением характеристики бароклинности в нижней половине тропосферы близки к модели UKMO. Доля узлов сетки с резкими контрастами ($|\text{grad}\ ZTE| \geq 70$, $F \geq 60$) в ПЛМ даже несколько больше, чем в модели UKMO. Однако в верхней половине тропосферы бароклинность прогностических полей несколько занижена в сравнении с анализом, что приводит к недооценке скоростей наиболее сильных СТ и занижению количества узлов с низкой тропопаузой, в сравнении с моделями NCEP и UKMO. Запасы энергии конвективной неустойчивости в анализе ПЛМ меньше, чем в моделях UKMO и NCEP, что может объясняться низким влагосодержанием в анализе модели, в особенности на ее нижнем уровне. В прогностических полях этот недостаток восполняется, однако он может явиться причиной недооценки интенсивности летних осадков. Другой причиной может быть отмеченная выше недооценка бароклинных механизмов вынуждения вертикальных движений в верхней половине тропосферы.

Book_Gidromet.indb 307 13.01.2010 13:14:47

Спектральная модель в конфигурации T85L31, являвшаяся основной оперативной моделью Гидрометцентра в течение нескольких лет, имеет ряд специфических особенностей как в анализе, так и в модельных динамических механизмах. Как показали оперативные испытания, модельные осадки прогнозируются в минимальном, по сравнению с другими моделями, количестве узлов сетки, причем интенсивность этих осадков завышена. Как видно из табл. 2, бароклинность в нижней половине модельной тропосферы в полтора — два раза ниже, чем в других моделях. Значит, генерация вертикальных движений ослаблена, что и приводит к пониженной повторяемости прогностических осадков. Далее, бароклинность (а это основной механизм генерации восходящих движений) ослаблена и в верхней половине модельной атмосферы, что видно из характеристик струйных течений и тропопаузы в анализе и прогнозе модели. Занижение скоростей сильных СТ в анализе (по сравнению с анализами UKMO, NCEP и с оперативным объективным анализом Гидрометцентра) можно считать следствием сглаженной бароклинности в нижней половине тропосферы, тогда как занижение прогностических скоростей СТ в сравнении с собственным анализом СМ объясняется только слабостью бароклинных механизмов в высотных фронтальных зонах. Объективный анализ, с которого стартует модель, чрезвычайно сильно сглаженный в нижних слоях, оказывается не столь сильно сглаженным в верхней половине тропосферы и в нижней стратосфере. Это видно из того факта, что характеристики струйных течений и тропопаузы (табл. 3 и 4) в СМ не столь резко отличаются от других моделей, как характеристики бароклинности в нижних слоях. Тем не менее, динамика модели в целом оказывается ослабленной и не обеспечивает должной генерации вертикальных движений, а значит и осадков.

Этот недостаток, на первый взгляд, может компенсироваться повышенными, в сравнении с другими моделями, запасами энергии конвективной неустойчивости, обусловленными высокой относительной влажностью на нижних уровнях. И действительно, в тех случаях, когда вертикальные движения достигают нужной интенсивности и энергия конвективной неустойчивости реализуется, модельные осадки оказываются сильными. Однако такие условия возникают в модели сравнительно редко, так что, несмотря на высокую влажность, повторяемость осадков оказывается минимальной.

Поэтому можно полагать, что наихудшие, в сравнении с другими моделями, показатели СМ в табл. 1 обусловлены, прежде всего, особенностями модельного анализа, сильно отличающегося от опе-

Book_Gidromet.indb 308 13.01.2010 13:14:47

ративного ОА Гидрометцентра как сглаженными полями геопотенциала и температуры, так и «перегруженностью» влагой на нижних уровнях. Представляется также, что в модели ослаблена генерация бароклинности в верхней тропосфере.

8. Заключение

Проблема верификации приобретает особое значение в условиях, когда становится доступной прогностическая продукция целого ряда глобальных и региональных моделей, каждая из которых является, сверх того, объектом дальнейшего совершенствования. С одной стороны, разработчики моделей заинтересованы в такой верификации, которая не ограничивалась бы расчетом простейших статистических характеристик, но позволяла бы наметить пути повышения качества прогноза. С другой стороны, потребители прогностической продукции заинтересованы в количественных характеристиках конкретных моделей с точки зрения специфических прикладных задач (таких, например, как авиационный прогноз). Предлагаемый в данной статье подход может быть полезен как разработчикам моделей, так и потребителям. Возможности данного подхода представлены здесь на примере практически важной задачи прогноза осадков. Охарактеризуем основные особенности предлагаемого подхода.

1. Выбор системы физически содержательных диагностических характеристик, описывающих важнейшие механизмы генерации восходящих движений, которые, как известно, определяют условия облако- и осадкообразования. В данном контексте такая система диагностик включает горизонтальные градиенты толщин слоев воздуха в нижней половине тропосферы, фронтальный параметр как меру бароклинности и кривизны поля давления, уровень нулевой плавучести как меру конвективной неустойчивости сеточного масштаба, а также высоту тропопаузы и скорость ветра в струйных течениях как характеристики глубоких вертикальных циркуляций.

2. Расчет выбранных диагностик как по прогностическим полям исследуемых моделей, так и по полям анализов, с которых стартуют модели. Как правило, в практике оценки качества прогнозов ограничиваются сравнением прогноза с наблюдениями согласно принятым алгоритмам; объективные анализы моделей остаются вне поля зрения стандартных методик оценки качества прогнозов. Между тем, как показано выше, причины недостатков модельных прогнозов порой кроются в особенностях начальных полей анализа.

Book_Gidromet.indb 309 13.01.2010 13:14:48

3. Сравнение (1) диагностических характеристик, рассчитанных по прогностическим полям и по полям модельного анализа на срок прогноза, и (2) характеристик, рассчитанных по полям анализа различных моделей. Первый тип сравнения позволяет оценить качества прогностической схемы, в том числе степень воспроизводства бароклинных зон в нижней и верхней тропосфере, атмосферных фронтов, конвективной неустойчивости. Второй тип сравнения позволяет оценить уровень и потенциал развития динамических механизмов, которые задаются начальными условиями и тем самым влияют на результат интегрирования уравнений модели. Как показано в пп. 4—6, расчет диагностик по полям объективного анализа позволяет обнаружить существенные различия конкретных моделей.

4. Оценка распределения разностей диагностик по спектру значений последних: иначе говоря, разбиение, при выполнении обоих типов сравнения, всего диапазона изменения диагностик на интервалы в соответствии с физическим смыслом и с прикладным значением данной характеристики. Таким образом, кроме средних по всему полю значений разностей диагностик, мы получаем оценки точности модельного описания участков полей с экстремальными характеристиками (резких бароклинных зон и фронтов, интенсивных струйных течений, воронок тропопаузы). Как показано в статье, средние по всей области характеристики (например, ошибка прогноза скорости ветра в табл. 3) часто малоинформативны, тогда как выделение физически наиболее значимых участков поля позволяет обнаружить «слабые места» модельной динамики (которые могут быть заложены в модель уже на стадии формирования начальных условий).

Применение предлагаемого подхода, который может быть назван «динамической верификацией», к задаче анализа начальных и выходных полей отечественных глобальных моделей (СМ и ПЛМ) с целью выявления причин недостаточно успешного прогноза осадков, в особенности летних, в сравнении с моделями NCEP и UKMO дало, как показано выше, определенные положительные результаты. Удалось обнаружить, что сравнительно невысокая успешность прогноза осадков по спектральной модели Гидрометцентра в ее нынешней оперативной конфигурации T85L31 обусловлена, прежде всего, следующими причинами: недостатками схемы объективного анализа, с которого стартует модель (сильное сглаживание бароклинных зон в нижней половине тропосферы и слишком высокая влажность на нижних уровнях), и слабой (возможно, также отчасти под влиянием начальных условий) генерацией бароклинности во всей толще тропо-

Book_Gidromet.indb 310 13.01.2010 13:14:48

сферы и нижней стратосферы, проявляющейся в сильном занижении интенсивности струйных течений и сглаживании топографии тропопаузы. Слабость бароклинных механизмов генерации вертикальных движений обусловливает низкую степень реализации энергии конвективной неустойчивости, хотя ее запасы в модели очень велики из-за высокой влажности. Все это приводит к низкой повторяемости модельных осадков и большому числу непредсказанных явлений, несмотря на завышенные запасы влаги. Следует надеяться, что в новой версии T169L31 спектральной модели указанные недостатки будут устранены; в противном случае повышение горизонтального разрешения может и не дать желаемых результатов.

Недостаточно успешный прогноз осадков по полулагранжевой модели, как показал наш анализ, связан прежде всего с особенностями начальных условий (низкая влажность вблизи подстилающей поверхности), приводящими к занижению запасов энергии конвективной неустойчивости в анализе модели. Механизмы генерации вертикальных движений (бароклинность, кривизна поля давления, фронтогенез) в нижней половине тропосферы воспроизводятся сравнительно адекватно. Однако глубокие тропосферно-стратосферные вертикальные циркуляции в высотных фронтальных зонах все же недооцениваются моделью (что проявляется в занижении скоростей ветра в струйных течениях и заметном сглаживании тропопаузы). Это обусловливает занижение степени реализации энергии конвективной неустойчивости, хотя генерация последней в прогностической схеме проходит достаточно успешно. В результате недооценивается повторяемость и количество осадков теплого периода.

Помимо отмеченных основных результатов, анализ рассчитанных диагностических характеристик позволил выявить также ряд менее значимых различий рассмотренных глобальных моделей, в том числе моделей UKMO и NCEP, прогноз которых в целом отличается высокой точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 07-05-00716-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Булдовский Г.С.* Успешность оперативных прогнозов температуры воздуха, осадков и ветра по Москве, Московской области и территории России в 1999 г. // Инф. сборник № 28, СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. С. 121—142.
2. *Веселова Г.К., Розинкина И.А., Фролов А.В.* Прогноз осадков по спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России с заблаговременностью 36—78 ч (результаты оперативных испытаний) // Инф. сборник № 25, СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. С. 3—20.

Book_Gidromet.indb 311 13.01.2010 13:14:48

3. *Иванова А.Р.* Метод расчета карты максимального ветра // Метеорология и гидрология, 1989, № 4. С. 59—64.
4. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД № 52.27.284-91, Комитет Гидрометеорологии при Кабинете министров СССР, М., 1991. 149 с.
5. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД № 52.88.629-2002, Росгидромет, М., 2002. 42 с.
6. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 702 с.
7. *Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П.* Автоматизированный метод прогноза зон активной конвекции // Метеорология и гидрология, 1991, № 5. с. 15—19.
8. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 263 с.
9. *Шакина Н.П., Борисова В.В.* Опыт применения потенциального вихря для расчета высоты и температуры тропопаузы // Метеорология и гидрология, 1992, № 9. С. 57—65.
10. *Шакина Н.П., Калугина Г.Ю., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. 1. Объективные характеристики фронтов, проведенных синоптиками // Метеорология и гидрология, 1998, № 7. С. 19—30.
11. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология, 2000, № 7. С. 5—16.
12. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Расчет динамических факторов генерации осадков по данным объективного анализа // Метеорология и гидрология, 2001, № 5. С. 22—34.
13. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Прогностическая значимость динамических факторов генерации осадков // Метеорология и гидрология, 2008, № 5. С. 31—44.
14. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Калугина Г.Ю.* Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. II. Объективное выделение зон фронтов // Метеорология и гидрология, 1998, № 8. С. 5—15.
15. *Arbogast P., Santurette P.* Improvement of model initial states using PV inversion. Proc. 5th EGU Plinius Conf., Ajaccio, Corsica, France, Oct. 2003.
16. *Carlson T.N.* Mid-latitude weather systems. HarperCollins Academic, London – NY, 1991. 507 p.
17. Definition of the tropopause. WMO Bull., 1957, 6. P. 136.
18. *Georgiev C.G.* Monitoring the environment of a tornado producing storm by using data from satellite water vapour channel and surface observations. Proc. 5th EGU Plinius Conf., Ajaccio, Corsica, France, Oct. 2003.
19. *Hoinka K.P.* Statistics of the global tropopause pressure // Mon. Weather Rev., 1998, 126. P. 3303—3325.
20. *Huber-Pock F., Kress Ch.* An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products // Meteorol. Atmos. Phys., 1989, 40, №. 2. P. 170—180.
21. Precipitation: Advances in measurement, estimation, and prediction. Ed. S. Michaelides. SpringerVerlag, Berlin – Heidelberg, 2008. 540 pp.

Book_Gidromet.indb 312 13.01.2010 13:14:49

Развитие методов прогноза погоды на основе статистической интерпретации гидродинамических моделей по технологии Гидрометцентра России

Р.М. Вильфанд, П.П. Васильев, Е.Л. Васильева
Гидрометцентр России

В Гидрометцентре России в последние годы разработана, реализована на комплексе ЭВМ и внедрена в оперативную практику новая усовершенствованная прогностическая технология расчета элементов погоды (РЭП) — численной интерпретации результатов интегрирования по времени и по пространству ГДМА (гидродинамических моделей атмосферы). Окончание разработки 2007 г., испытание 2007—2008 гг., внедрение (по решению ЦМКП от 24.10.2008) 2008—2009 гг. Системы статистической интерпретации, как известно, применяются для прогнозов основных элементов погоды на основе использования результатов интегрирования глобальных гидродинамических моделей, а также для повышения оправдываемости прогноза элементов погоды, полученных из мезомасштабных гидродинамических моделей (например, COSMO и др.). При этом, как правило, осуществляется расчет синхронных (статистических) связей между прогностическими полями, полученными по гидродинамической схеме (основными предикторами — левые части переопределенной системы уравнений множественной регрессии) и фактически наблюдаемыми значениями элементов погоды (предиктантами — правые части уравнений). Именно использование синхронных связей (применимых благодаря хорошей оправдываемости современных ГДМА) обусловливает успех объективного прогноза элементов погоды.

Естественно, что для успешной работы системы статистической интерпретации (статистического постпроцессинга) необходимо создание соответствующей базы данных — архива фактических значений прогнозируемых метеорологических элементов в пунктах прогноза, а также архивов полей объективного анализа и прогноза ГДМА за период 10—15 лет.

Прогностическая технология РЭП программно реализует полностью адаптивный алгоритм – самообучающийся по исходной дате на текущий сезон, на дату прогноза по заблаговременности, на ге-

Book_Gidromet.indb 313 13.01.2010 13:14:49

ографический район прогнозирования (пункт прогноза) и на синоптический макропроцесс, спрогнозированный ГДМА. Для каждого из этих параметров статистическая модель строится и решается заново. Структура оперативной программной технологии среднесрочного прогноза погоды РЭП представлена на рис. 1.

При создании РЭП реализованы: методология построения адаптивных моделей для прогноза; разработан метод центрального типирования синоптических макропроцессов и алгоритмы автоматического формирования выборок с использованием метода аналогичности и с динамическим отбором предикторов на каждом этапе; создан алгоритм по усвоению, контролю и восстановлению данных метеонаблюдений (уровня II) и данных уровня III, получаемых в коде GRIB, для их сбора и архивации в среднесрочной проблемно-ориентированной базе данных (СПОБД). Эта база данных разработана и реализована нами специально для постпроцессинга статистической интерпретации. СПОБД круглосуточно пополняется оперативными данными, поступающими по каналам связи в ГРМЦ. Разработана и реализована справочно-информационная база (SNOB) для автоматической комплектации прогностической продукции и распространения ее пользователям; сформированы климатические архивы метеоданных на дисках (с использованием климатических данных ВМО и ВНИИГМИ-МЦД).

Прогностическая технология РЭП предусматривает возможность формирования выпускаемой продукции для потребителей по различным номенклатурам: по административным и экономическим районам страны, по энергосистемам, по бассейнам рек, по побережьям морей и т.д. Система связана с каналами связи Главного Радиометцентра Росгидромета и осуществляет круглосуточно: прием данных, расчет прогнозов и распространение прогнозов потребителям — в оперативные подразделения ГУ «Гидрометцентр России» и Росгидромета, во все УГМС России и некоторых стран СНГ, в МосЦГНС и в другие организации.

Информационная база

Прогностическая технология (РЭП) реализована для городов всего земного шара (5000 городов) и детализирована для территории России; расчеты производятся в оперативные сроки и в силу этого РЭП должна обладать архивно-информационной базой данных уровня II (данные метеорологических наблюдений) и уровня III (обработанные

Book_Gidromet.indb 314 13.01.2010 13:14:49

данные фактических анализов метеорологических полей и поля метеоэлементов, полученные в результате интегрирования по времени и по пространству гидродинамических моделей атмосферы), отвечающей требованиям новых компьютерных технологий. Необходимость создания проблемно-ориентированной базы данных для среднесрочных прогнозов погоды обусловлена рядом требований, которым должен удовлетворять архив нашей задачи. Во-первых, при прогнозировании элементов погоды на средние сроки для учета особенностей текущего атмосферного макропроцесса целесообразно включение в обучающие выборки данных за сроки, непосредственно примыкающие ко времени начала расчета прогноза. Следовательно, отсюда вытекает требование к оперативности пополнения архива поступающими прогностическими и фактическими метеоданными. Во-вторых, для получения на той или иной выборке статистически значимых корреляционных связей между предикторами и предиктантами статистические совокупности, формируемые для этого из обобщенных архивных данных, должны быть достаточно репрезентативными. Это означает необходимость наличия в архиве достаточно длинных (по времени) рядов данных: результатов наблюдений, объективных анализов и гидродинамических прогнозов (более 10 лет). Следующим требованием является выборочность архивируемых метеоэлементов и уровней атмосферы, на которых они представлены. Этот список определяется наборами прогнозируемых метеоэлементов (предиктантов) и используемых предикторов, отобранных из физических соображений. Далее идут такие требования, как возможность оперативного мобильного территориального районирования содержащейся информации, позволяющего реализовать численные алгоритмы текущего и режимного контроля поступающей метеоинформации с целью выявления дефектных данных и исправления или исключения их. Имеющиеся в настоящее время архивы метеорологической информации, как например, Центральный гидрометеорологический архив ВНИИГМИ-МЦД или архив Гидрометцентра России отвечают не всем вышеприведенным требованиям (что вполне естественно). Так, архив ВНИИГМИ-МЦД, хотя содержит достаточно длинные ряды метеорологической информации, но не отвечает требованию оперативного (несколько раз в сутки) пополнения новыми данными и возможности непосредственно прямого доступа к различным разделам архива и т.д.

Нами была специально спроектирована, программно реализованная на ЭВМ и заполнена путем ручного ввода с дисплея справочная структура SNOB, которая периодически пополняется. SNOB

Book_Gidromet.indb 315 13.01.2010 13:14:50

состоит из различной по типу данных (character, integer, real — константы и кодированная последовательность ссылок для поиска и последующего автоматического формирования прогностической продукции), но логически связанной информации, организованной в виде больших по объему наборов данных (в виде структур и списков). Она содержит характеристики метеостанций базовых списков (географические координаты, индекс, название, высоту над уровнем моря, часовой пояс, признак принадлежности к административно-территориальной номенклатуре с соответствующими легендами и т.д.). Длительная и многоцелевая практическая эксплуатация SNOB в различных алгоритмах и задачах показала ее чрезвычайную целесообразность.

Как уже говорилось, поля фактических значений метеоэлементов (уровень II) должны быть соответствующим образом проконтролированы и отсутствующие (или забракованные) данные дополнены. Это является сложной задачей с точки зрения физики и технологии, так как элементы погоды обладают большим разбросом как своих экстремальных значений, так и радиусом пространственной корреляции: от нескольких десятков до нескольких сотен километров; поступающие в ГРМЦ данные также иногда содержат ошибки кодировки или ошибки передачи из-за сбоев на каналах связи.

Общая схема прогностического алгоритма

Для решения прогностических задач нами была разработана единая методология прогностического расчета элементов погоды. На ее основе численно реализовались конкретные схемы статистического прогноза для различных метеоэлементов. Остановимся на основных общих компонентах прогностической методологии.

Центральное типирование атмосферных макропроцессов. Статистическая модель строится (автоматически на ЭВМ) заново (выборки формируются динамически) для каждой даты и для каждого пункта прогноза, при этом всегда рассматривается ограниченный географический район, ориентированный таким образом, чтобы пункт прогноза был расположен в его центре. В отличие от прежнего [1], в новом варианте центрирование осуществляется не с точностью до ближайшего узла географической сетки, а с точностью до минуты географических координат. Статистические выборки формируются с упорядочением по аналогичности к текущему макропроцессу, предсказанному гидродинамической схемой.

Book_Gidromet.indb 316 13.01.2010 13:14:50

Непрерывность по территории прогностических полей. Для расчета прогноза созданы программные средства доступа к архиву метеорологических полей — предикторов и предиктантов — позволяющие строить и решать прогностические уравнения регрессии, удовлетворяя принципу пространственной непрерывности. Непрерывность понимается в том смысле, что при уменьшении расстояния между двумя пунктами прогноза до нуля значение коэффициента перекоса между матрицами предикторов, соответствующее этим пунктам, будет также стремиться к нулю.

Сезонная классификация. Для формирования статистических обучающих выборок к рассмотрению привлекаются даты, принадлежащие к тому же скользящему сезонному периоду, к которому принадлежит день прогноза. Величина интервала дат, к которым относятся динамически формируемые статистические выборки (для нового варианта) составляет около 3-х недель.

Оптимизация заблаговременности архивов (ОЗА), используемых для формирования обучающих выборок. Как известно, для построения обучающих выборок регрессионных моделей используются концепции MOS или PP [5, 6]. Для малой заблаговременности (24—36 ч) концепция MOS имеет несомненные преимущества, так как обучение статистической модели на выборках, состоящих из гидродинамических прогнозов, позволяет учитывать систематические ошибки (тренд) гидродинамической схемы. Однако анализ полей гидродинамических прогнозов показывает, что у ГДМА присутствуют наряду с систематическими ошибками ошибки случайного характера, обусловленные исходными данными или несовершенством параметризации. «Уход» схемы несистематическим образом от развивающегося в действительности атмосферного процесса с заблаговременностью прогноза увеличивается. Таким образом, накапливая архивы гидродинамических прогнозов (например, на 5—7-е сутки), мы заведомо предопределяем обучение статистической модели на неадекватных связях с несистематической неадекватностью. В этом случае концепция MOS становится неэффективной. Выходом может являться в какой-то мере использование архивов прогнозов ГДМА с меньшей заблаговременностью (MOS-1, MOS-2), так как при этом, с одной стороны, можно частично исключить систематический тренд, присутствующий в прогнозах большой заблаговременности, с другой стороны, снижая заблаговременность архивов, мы уменьшаем вклад несистематических ошибок.

Book_Gidromet.indb 317 13.01.2010 13:14:50

Численные статистические модели прогноза

Метод среднесрочного прогноза минимальной и максимальной температуры воздуха по дням. Строится адаптивная численная статистическая модель, основанная на использовании синхронных прогностических связей. Имея в последние годы информацию в кодах ГРИБ от нескольких ведущих метеорологических центров мира, мы в новой технологии осуществляем расчет статистик по данным нескольких метеоцентров (ECMWF (Reding), UKMO (Exeter) и NCEP США). Далее осуществляется комплексация результатов с весами, пропорциональными скользящей оправдываемости прогнозов соответствующих ГДМА.

Основными предикторами являются следующие:

δt — аномалия температуры воздуха у поверхности Земли для предшествующих суток в точке прогноза; для минимальной температуры — предшествующей ночи, для максимальной — дня; при восстановлении прогностических значений по вычисленным коэффициентам регрессии на первые сутки используется фактическая температура, на все последующие — спрогнозированная по РЭП (на предыдущие сутки);

OT_{1000}^{500} — относительная топография в районе (точке) прогноза (РП);

H_{500}; P_s dp_s/dt; Δp_s, ΔH_{500}, $d\Delta p_s/dt$, $d\Delta H_{500}/dt$, $dp_s/d\lambda$, $dH_{500}/d\lambda$, $dH_{500}/d\varphi$, $\sqrt{U_g^2+V_g^2}$, U_g, V_g;

$\tau_\circ$ — долгота дня в РП; T_{850}, ΔT_{850} $d\Delta T_{850}/dt$, (H,T) — адвекция температуры (якобиан) на уровне 850 гПа в РП, F% — влажность в РП, ζ_λ и ζ_φ — интенсивности зонального и меридионального потоков для средней тропосферы в РП:

$$\zeta_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{dH_{500}(\varphi,\lambda)}{d\varphi} d\lambda,$$

$$\zeta_\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{dH_{500}(\varphi,\lambda)}{d\lambda} d\varphi,$$

$d\zeta_\lambda/dt$, $d\zeta_\varphi/dt$, — временные тенденции ζ_λ и ζ_φ в РП;

dT/dz_{850} — величина, характеризующая вертикальный градиент температуры в нижней тропосфере в РП.

Book_Gidromet.indb 318 13.01.2010 13:14:51

Во всех вышеуказанных предикторах при расчете дифференциальных и интегральных операторов в конечно-разностной форме использовались пространственные трафареты для сферических трапеций $\varphi 1$, $\varphi 2$, $\lambda 1$, $\lambda 2$ различных масштабов, данные по которым могут одновременно участвовать в просеивании (см. ниже).

Осуществляется пошаговое просеивание с сокращением размерности вектора предикторов [2, 3]. Затем для отобранных компонент решением переопределенной системы уравнений множественной регрессии находится искомый вектор коэффициентов регрессии. Этот вектор служит для расчета прогностического значения отклика путем свертки его с вектором оперативных предикторов по этому же списку компонент.

Численная статистическая модель строится заново для каждой точки, даты и заблаговременности прогноза. Кроме основного преимущества, заключающегося в возможности получения прогноза, детализированного по времени и по пространству, адаптивная схема в совокупности с пошаговым просеиванием обладает тем удобством, что позволяет включить в комплект исходных предикторов достаточно много (с запасом) физически значимых параметров, не учитывая возможное изменение уровня их значимости для разных синоптических макропроцессов или географических районов, при изменении которых меняется принадлежность пунктов прогноза к часовым поясам, орографическим зонам и т.д. Понятно, что в связи с привязкой информации различных ГДМА к различным исходным срокам наблюдения (00, 06, 12, 18) информативность некоторых выбранных нами предсказателей может «плавать» с изменением географической долготы очередного пункта прогноза. В этом случае, благодаря построенной нами вычислительной схеме прогноза, оказавшиеся неинформативными предикторы автоматически исключаются из рассмотрения.

Прогноз осуществляется раздельно для минимальной и максимальной температуры воздуха.

Метод прогноза средней за декаду температуры воздуха. Для расчета прогностического значения средних за 10 дней аномалий температуры воздуха в нашем случае необходимо было спрогнозировать средние температуры за 8-й, 9-й и 10-й день. Для этого была построена самостоятельная (также полностью адаптивная) статистическая модель, в потенциальные предикторы которой, в силу физического содержания предиктанта, входят величины, связанные с перестройкой (тенденциями изменения) высотного поля

Book_Gidromet.indb 319 13.01.2010 13:14:52

геопотенциала (характеризующего крупномасштабные условия формирования и перемещения воздушных масс), осредненные по площади, окружающей точку прогноза. Эти предикторы дополнялись предикторами из модели прогноза температуры воздуха по дням. В качестве предикторов для прогноза средней за трое суток температуры воздуха использовались следующие величины:

δT_6, δT_7 — аномалии температуры воздуха для 6-х и 7-х суток в РП;

$\left.\frac{dT}{dt}\right|_{\tau=6}$, $\frac{1}{3}\sum\frac{\delta T_i}{\sigma}$ — тенденция температуры и накопленная аномалия температуры воздуха в РП накануне прогнозируемой трехдневки (8-х, 9-х и 10-х суток);

средние значения OT_{1000}^{500}, H_{500}, T_{850} и их тенденции накануне прогнозируемой трехдневки (по сферической трапеции, центрированной на пункт прогноза):

$$\frac{1}{S}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} OT(\varphi,\lambda)\,d\varphi\,d\lambda = SOT,\ d(SOT)/dt\,,$$

$$\frac{1}{S}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} H_{500}(\varphi,\lambda)\,d\varphi\,d\lambda = SH5,\ d(SH\,5)/dt,$$

$$\frac{1}{S}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} T_{850}(\varphi,\lambda)\,d\varphi\,d\lambda = ST85,\ d(SOT)/dt.$$

Прогноз аномалии температуры воздуха на декаду получался (после просеивания предикторов, решения уравнений множественной регрессии и расчета прогностического значения предиктанта δT_{8-10}) следующим образом:

$$\delta T_{dek} = \frac{1}{10}\left(\sum_{i=1}^{7}\delta T_i + 3*\delta T_{8-10}\right),$$

где первое слагаемое в правой части набиралось из спрогнозированных ранее аномалий температуры воздуха по дням.

Метод прогноза вероятности и количества полусуточных сумм осадков по дням по всей территории России. Предсказание поля осадков является чрезвычайно сложной прогностической задачей.

Book_Gidromet.indb 320 13.01.2010 13:14:52

Даже краткосрочный прогноз осадков (24—36 ч) часто бывает неудовлетворительным и лишь незначительно по оправдываемости превосходит инерционные прогнозы. Кроме большой сложности физики процесса, затруднения вызывает подчас даже формулировка этого явления в связи с различными оценками его потребителями. Для сельского хозяйства, как правило, важна общая сумма осадков за достаточно большой промежуток времени (≥ 24—48 ч) и относящаяся к площадям порядка административной области; для пешеходов даже кратковременный и локальный, но сильный ливень представляется существенным. Оценивая существующий уровень научных исследований в этой области в ведущих мировых метеоцентрах, можно сказать, что наиболее обоснованным в современных гидродинамических моделях является рассмотрение обложных осадков, связанных с фронтальными зонами и выпадающих из высокослоистых (*As*), слоистых (*St*) и слоисто-дождевых (*Ns*) облаков. Эти зоны связаны с областями упорядоченных восходящих движений воздуха, пространственная протяженность которых составляет сотни километров и поля изогиет достаточно однородны. Удобно характеризовать суточные суммы осадков одновременно тремя величинами: полусуточной суммой осадков на конкретной станции, а также максимальной и средней полусуточными суммами осадков, выпавших на территории радиусом около 15—20 км (что примерно соответствует, например, площади г. Москвы), окружающей эту станцию.

Расчетная схема для прогноза осадков выглядит следующим образом:

шаг 1 — подготовка двумерной матрицы наблюдений (из архивного материала) для оценки информативности исходных переменных;

шаг 2 — отбор предикторов;

шаг 3 — подготовка одномерного массива с разбиением на классы без осадков (б/о), осадки (R) для дальнейшего расчета дискриминантных функций — *f discr* б/о, *f discr* R;

шаг 4 — вычисление объединенной матрицы рассеяния, расстояния Махаланобиса, расчет вероятностей, соответствующих наибольшим дискриминантным функциям, коэффициентов соответствующих дискриминантных функций и т.д.;

шаг 5 — свертка коэффициентов дискриминантных функций с оперативными переменными для принятия решения о прогнозе класса б/о или R; в случае прогноза класса б/о вычисления заканчиваются, прогностическое значение класса (б/о) засылается в массив результатов; в случае прогноза класса R выполняются следующие шаги:

Book_Gidromet.indb 321 13.01.2010 13:14:53

шаг 6 — повторная генерация двумерной матрицы наблюдений;

шаг 7 — пошаговое решение уравнений множественной регрессии (с отбором предсказателей);

шаг 8 — свертка полученных коэффициентов регрессии с оперативными переменными для прогноза количества осадков (мм). Разделение полученных осадков по градациям: слабые, умеренные, сильные. Засылка прогностического значения в массив результатов.

Вероятность осуществления спрогнозированного класса осадков рассчитывается по формуле

$$P_{б/о,R} = 100\% / \left(e^{(f\,discr\ б/о - f\,discr\max)} + e^{(f\,discrR - f\,discr\max)}\right)$$

Прогонка всех шагов расчетной схемы, как уже говорилось выше, осуществляется заново для каждого пункта прогноза и для каждой даты и каждой заблаговременности прогноза. При этом привлекается концепция ОЗА. В качестве предикторов (после расчета прогноза минимальной и максимальной температуры воздуха) привлекаются доступные нам характеристики термической стратификации атмосферы, нижнем 5-километровом слое. Наряду с этим, в качестве независимых предсказателей участвуют параметры, описывающие наличие фронтальных зон; судить об этом мы считали возможным по результатам расчета максимального градиента поля T_{850} в рассматриваемом районе. Также привлекается максимальное значение скорости геострофического ветра, дивергенции и влажности на разных уровнях

Программная реализация прогностического алгоритма

Вышеописанные алгоритмы реализованы на ЭВМ в виде большого комплекса программ на «ФОРТРАНЕ», содержащих несколько десятков тысяч операторов. Большую часть (40%) программного обеспечения занимают подсистемы подготовки информации.

Основные блоки последовательной обработки информации включают в себя (рис. 1):

– блок чтения оперативных данных по срокам и уровням, уровень II (КН-01), уровень III (ECMWF (Reding), UKMO (Exeter) и NCEP США);

– контроль и восстановление данных, сшивка по географическим принадлежностям, формирование наборов для архивов, запись в архивы;

– чтение полей и подготовку временных выборок для статистической обработки процедурами дискриминантного анализа и множественной регрессии с учетом текущей даты;

Book_Gidromet.indb 322 13.01.2010 13:14:53

Book_Gidromet.indb 323 13.01.2010 13:14:53

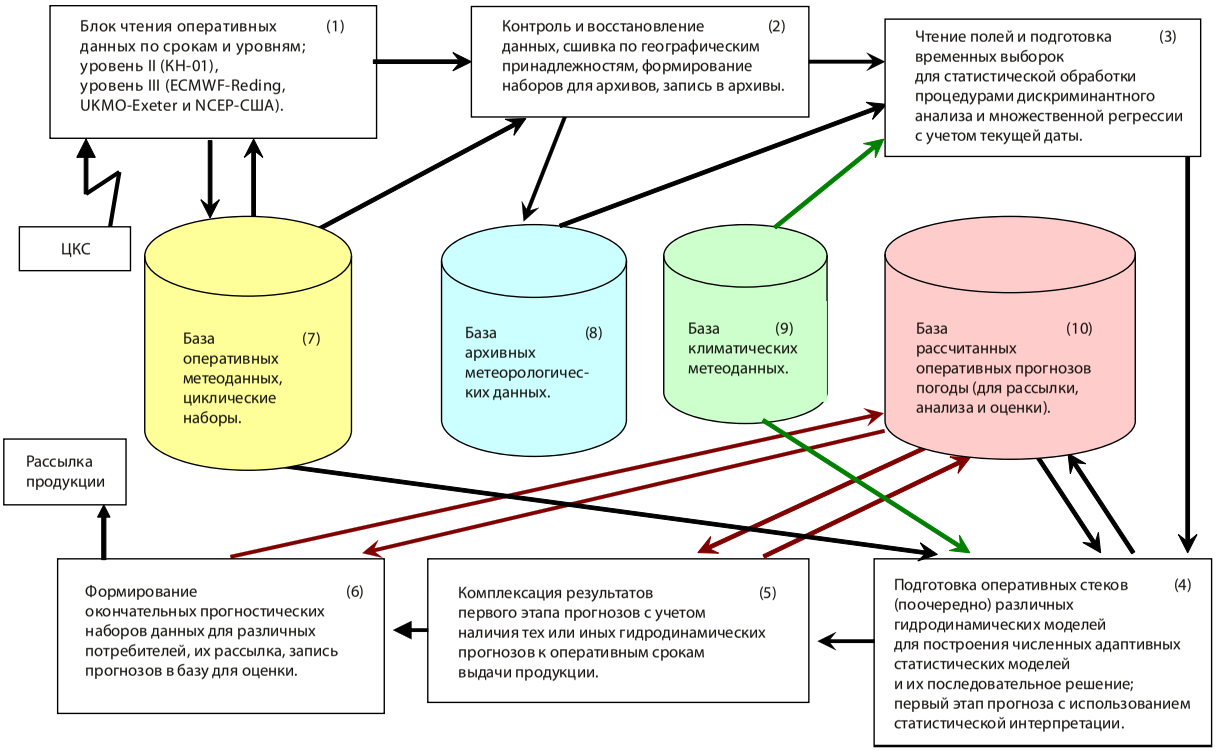


Рис. 1. Структура оперативной программной технологии среднесрочного прогноза погоды (РЭП). Гидрометцентр России 2008 г.

– подготовку оперативных стеков (поочередно) различных гидродинамических моделей для построения численных адаптивных статистических моделей и их последовательное решение;

– первый этап прогноза с использованием статистической интерпретации;

– комплексация результатов первого этапа прогнозов с учетом наличия тех или иных гидродинамических прогнозов (для пересчета статистики) к оперативным срокам выдачи продукции;

– формирование окончательных прогностических наборов данных для различных потребителей, их рассылка, запись прогнозов в базу для оценки.

При этом используются следующие проблемно-ориентированные базы данных:

– база оперативных метеоданных циклических наборов;

– база архивных метеорологических данных;

– база климатических метеоданных;

– база оперативных прогнозов погоды для рассылки потребителям, анализа и оценки.

Прогностическая продукция с использованием справочной структуры SNOB комплектуется по различным территориальным спискам и передается в оперативные подразделения ГУ «Гидрометцентр России» и Росгидромета, в УГМС, МосЦГНС и в различные другие организации. Первый ежедневный прогностический цикл РЭП заканчивается к 07.00 часам московского времени.

Метод прогноза ОЯ аномально-холодной (аномально-жаркой) погоды с заблаговременностью 48—144 ч

В октябре 2008 г. перед Гидрометцентром России встала новая задача о прогнозировании ОЯ с достаточно большой заблаговременностью — порядка нескольких суток в связи с распоряжением в его адрес руководителя Росгидромета о гидрометеорологическом обеспечении *Правительственной комиссии по обеспечению безопасности электроснабжения (федерального штаба) и объектов электроэнергетики в субъектах Российской Федерации в отопительный период*. В Руководящем документе Росгидромета (РД №52.88.699-2008) [4] определены виды и критерии опасных явлений погоды ОЯ, к которым относятся аномально-холодная

Book_Gidromet.indb 324 13.01.2010 13:14:54

(аномально-жаркая) погода, определенная как сохранение над данной территорией температуры воздуха на 7°С ниже нормы (и холоднее) в течение 4-х дней и более.

Исходя из многолетнего опыта обеспечения прогнозами температуры воздуха различных областей хозяйства, в том числе связанных с энергопотреблением, мы видим эффективность в использовании не только прогнозов температуры воздуха (или их средних по времени за какой-либо период), но и соответствующих им прогнозов аномалий температур воздуха (или их средних по времени за какой-либо период). Как известно, в любой момент времени значение температуры можно представить в виде суммы климатической нормы и аномалии температуры воздуха. Ввиду достаточно высокой оправдываемости прогнозов температуры воздуха (по схеме РЭП) при организации в Гидрометцентре России в отопительные периоды технологии составления предупреждения об ОЯ аномально-холодной погоде была реализована следующая методология.

Ежедневно дежурному синоптику отдела прогнозов опасных явлений Гидрометцентра России предоставлялись такие материалы (подготовленные по схеме РЭП), как: прогностические карты по территории России ежедневной аномалии температуры воздуха на 48—144 ч (5 карт), прогностические карты по территории России аномалии температуры воздуха, средние за пентаду с заблаговременностью 2 суток; прогностические карты по территории России аномалии температуры воздуха, средней за декаду с нулевой заблаговременностью; таблицы прогноза средней пентадной температуры воздуха и ее аномалии по 86 субъектам Федерации; таблицы прогнозов экстремально низкой температуры воздуха для каждого из 86 субъектов Федерации, выбранных из 1335 городов России (по которым рассчитывается прогноз по схеме РЭП) с указанием географических координат (φ, λ), индексов, норм и названий соответствующих пунктов.

После анализа синоптиком-прогнозистом этих материалов и обнаружения по ним угрозы появления ОЯ передается соответствующее предупреждение в *Правительственную комиссию по обеспечению безопасности электроснабжения (федеральный штаб).*

Таким же образом представляется возможным прогнозирование ОЯ аномально-жаркой погоды, когда значения среднесуточной температуры воздуха для какой-либо территории выше климатической нормы на 7°С и более.

Book_Gidromet.indb 325 13.01.2010 13:14:54

Оценки оправдываемости оперативных прогнозов по методу РЭП по территории России

Благодаря разработке и внедрению вышеописанной схемы РЭП в настоящее время в Гидрометцентре России осуществляется:

– ежедневный оперативный расчет детализированного по дням (а для первых 3-х суток по 4-м основным срокам) прогноза погоды до 7-ми суток по 5000 городам мира (из них по России 1300);

– ежедневный оперативный расчет прогноза средней температуры воздуха и ее аномалии на 10 дней вперед (декадный прогноз), выдаваемый в виде таблиц и карт изотерм;

– оперативный расчет прогнозов по обновляемым данным несколько раз в сутки, которые ежедневно трижды (в 04.00, 04.50 и в 12.00 ВСВ) передаются во все УГМС России, в УГМС Белоруссии и НГМС Таджикистана;

– ежедневное обслуживание оперативных подразделений Росгидромета и Гидрометцентра России в соответствии с расширяющимися требованиями оперативной работы (например, по прогнозу ОЯ аномально-холодной погоды);

– обслуживание оперативных запросов на прогнозы погоды из Администрации Президента и из различных министерств и ведомств (МЧС, Минэкономразвития России и др.). Например, начиная с августа 2009 г. передаются детализированные по пунктам прогнозы полусуточных осадков для составления гидрологических прогнозов по территории водосбора Саяно-Шушенской ГЭС.

Для оценки оправдываемости вышеупомянутых прогнозов, рассчитываемых оперативно, в базы данных лаборатории испытаний новых методов прогноза Гидрометцентра России ежедневно записываются рассчитанные по схеме РЭП прогнозы для различной номенклатуры и различной заблаговременности. Ежемесячно на оперативных дирекциях Гидрометцентра России представитель этой лаборатории докладывает текущие оценки прогнозов по различным численным моделям. Приведем некоторые из полученных в лаборатории испытаний таблиц оправдываемости. В табл. 1а и табл. 1б приведены данные об оправдываемости прогноза экстремальных температур воздуха для 81 субъекта Федерации за месяцы январь и октябрь 2009 г. в сравнении с оправдываемостью инерционных прогнозов и прогнозов, составляемых в УГМС России и передаваемых для оценки в Гидрометцентр России в коде КП-68. В табл. 2а и 2б приведена оценка оправдываемости прогнозов средней

Book_Gidromet.indb 326 13.01.2010 13:14:55

Таблица 1а

Показатели успешности прогнозов T_{min}, T_{max} до трех суток, составленных в УГМС(КП-68) и в Гидрометцентре России (РЭП) по административным центрам субъектов РФ за январь 2009 г.

ZZ	Метод прогноза	T	N	ОШИБКИ			$U_н$, %	$U_н$-$U_{ин}$, %
				δ, °C	|δ|, °C	|ε|		
1-е сутки	УГМС	min	2294	0.0	2.3	0.59	80	23
		max	2283	-0.3	2.2	0.69	81	15
	РЭП	*min*	2294	0.0	*2.2*	0.56	*81*	*24*
		max	2283	0.2	**1.9**	0.57	**86**	**20**
	Инерция	min	2294	0.3	3.9	1.00	57	
		max	2283	0.2	3.3	1.00	66	
2-е сутки	УГМС	min	1067	-0.2	2.8	0.54	70	25
		max	1070	-0.5	2.4	0.56	79	23
	РЭП	*min*	*1067*	-0.2	*2.3*	0.40	*80*	*35*
		max	**1070**	0.2	**1.9**	0.43	**87**	**31**
	Инерция	min	1067	0.3	5.6	1.00	45	
		max	1070	0.3	4.4	1.00	56	
3-и сутки	УГМС	min	1056	-0.4	3.0	0.48	66	29
		max	1058	-0.5	2.5	0.52	75	27
	РЭП	*min*	*1056*	-0.2	*2.4*	0.37	*76*	*39*
		max	**1058**	0.2	**2.0**	0.39	**84**	**36**
	Инерция	min	1056	0.1	6.6	1.00	37	
		max	1058	0.4	5.2	1.00	48	

Book_Gidromet.indb 327 13.01.2010 13:14:55

Таблица 1б

Показатели успешности прогнозов T_{min}, T_{max} до трех суток, составленных в УГМС(КП-68) и в Гидрометцентре России (РЭП) по административным центрам субъектов РФ за октябрь 2009 г.

ZZ	Метод прогноза	T	Количество прогнозов	Ошибки			$P_н$, %	$P_н$-$P_{ин}$, %
				δ_t	$\|\delta_t\|$	ε_t		
1-е сутки	УГМС	min	2361	-0.2	1.8	0.59	90	26
		max	2265	-0.5	1.8	0.68	88	15
	РЭП	*min*	2307	-0.1	*1.6*	0.49	*94*	*29*
		max	2265	0.1	**1.4**	0.50	**95**	**22**
	Инерция	min	2307	0.3	3.2	1.00	64	
		max	2265	0.4	2.7	1.00	73	
2-е сутки	УГМС	min	1603	-0.3	2.1	0.60	83	31
		max	1577	-0.5	1.8	0.55	87	28
	РЭП	*min*	1604	-0.1	*1.8*	0.43	*91*	*38*
		max	1578	0.2	**1.6**	0.45	**90**	**32**
	Инерция	min	1604	0.7	4.2	1.00	53	
		max	1578	1.0	3.6	1.00	59	
3-и сутки	УГМС	min	1604	-0.3	2.4	0.61	79	27
		max	1577	-0.5	2.0	0.54	82	28
	РЭП	*min*	1602	-0.1	*2.0*	0.48	*85*	*33*
		max	1575	0.2	**1.9**	0.49	**87**	**32**
	Инерция	min	1602	1.1	4.2	1.00	52	
		max	1575	1.5	4.0	1.00	55	

Book_Gidromet.indb 328 13.01.2010 13:14:55

Таблица 2а

Оценка декадных прогнозов температуры воздуха, составленных в Гидрометцентре России (прогнозов аномалии средней за декаду температуры воздуха) по территории России в январе 2009 г.

Методический прогноз			Инерционный прогноз		
Средняя за 21 скользящие декады (01.01— 21.01.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
2.0	0.8	92.0	4.5	0.3	56.7
Средняя за 3 декады (01—10, 11—20, 21—30.01.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
1.9	0.8	93.0	4.4	0.3	59.3
За первую декаду (01—10.01.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
2.0	0.7	94.5	3.9	0.3	63.5
За вторую декаду (11—20.01.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
1.8	0.9	96.0	5.0	0.0	52.5
За третью декаду (21—30.01.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
2.1	0.7	88.7	4.3	0.5	62.0

Book_Gidromet.indb 329 13.01.2010 13:14:56

Таблица 2б

Оценка декадных прогнозов температуры воздуха, составленных в Гидрометцентре России (прогнозов аномалии средней за декаду температуры воздуха) по территории России в октябре 2009 г.

Методический прогноз			Инерционный прогноз		
Средняя за 21 скользящие декады (01.10—21.10.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
1.1	0.9	97.1	2.3	0.8	74.2
Средняя за 3 декады (01—10, 11—20, 21—30.10.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
1.1	0.9	95.8	2.5	0.7	69.5
За первую декаду (01—10.10.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
1.2	0.8	99.1	2.2	0.7	77.6
За вторую декаду (11—20.10.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
1.2	0.9	92.6	2.2	0.9	74.2
За третью декаду (21—30.10.2009)					
DA	RO	P%	DA	RO	P%
1.1	0.9	95.7	3.2	0.4	56.7

Book_Gidromet.indb 330 13.01.2010 13:14:56

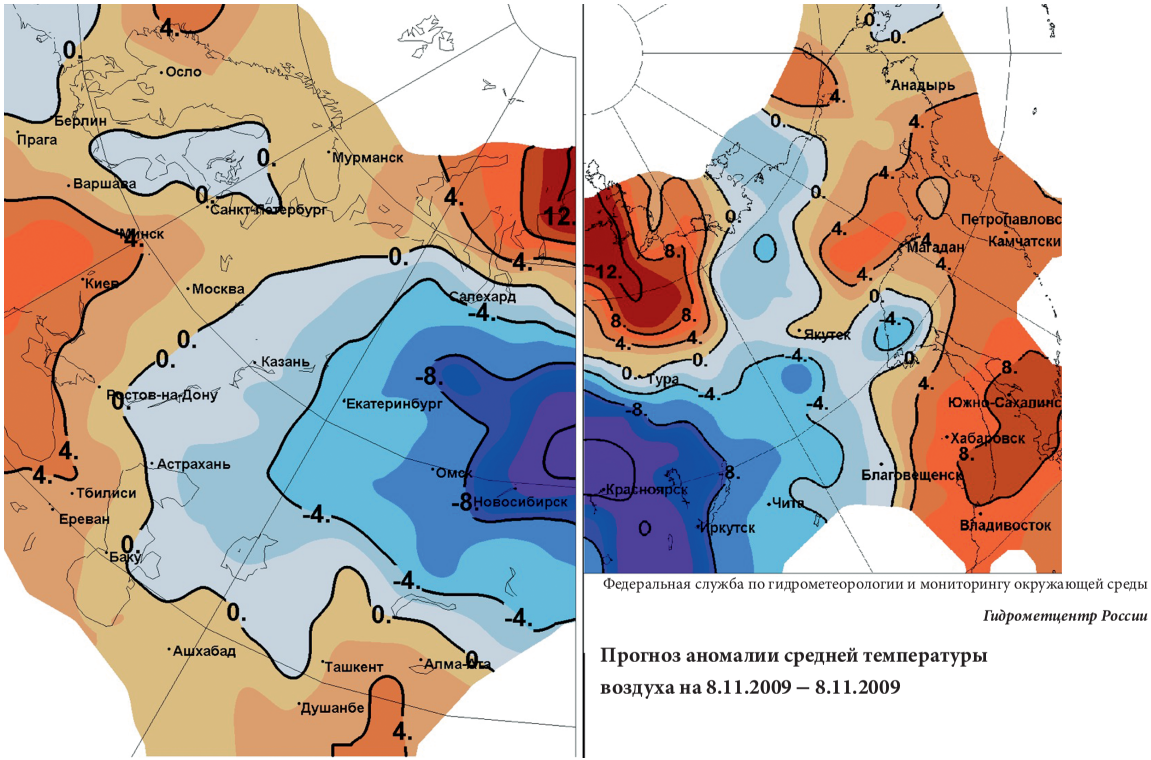


Рис. 2а. Прогноз аномалии температуры воздуха на 8 ноября 2009 г. (заблаговременность 120 ч) по исходным данным 3 ноября 2009 г.

Book_Gidromet.indb 331
13.01.2010 13:14:57

Book_Gidromet.indb 332

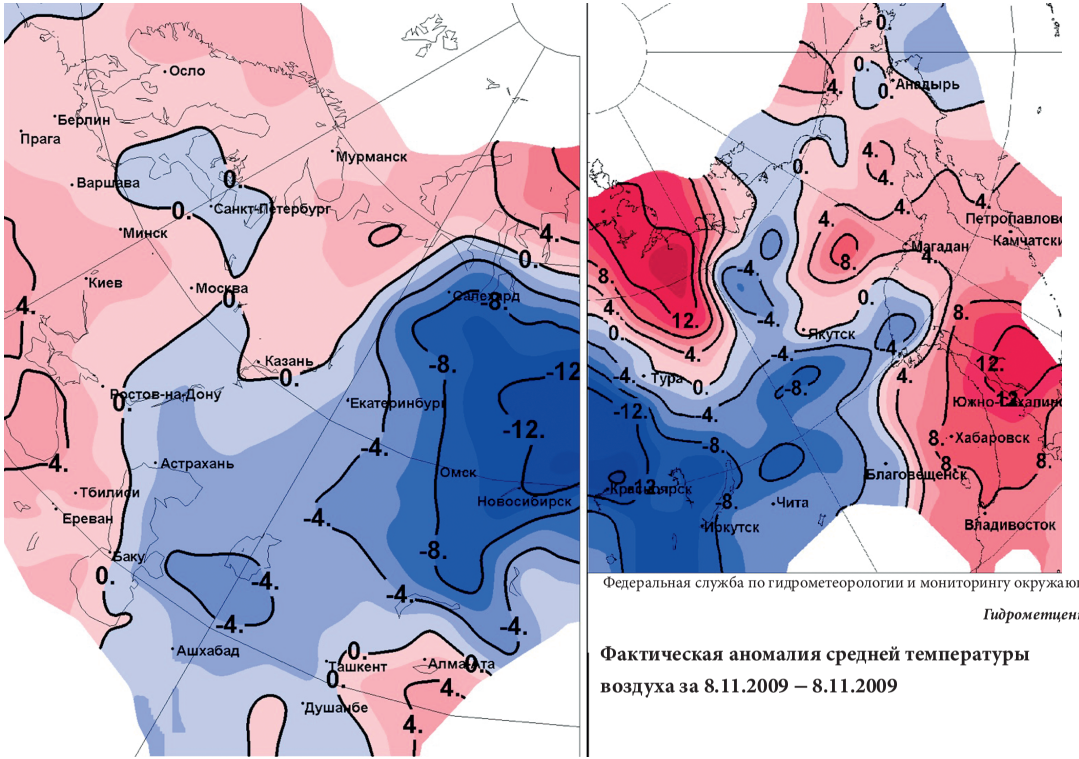
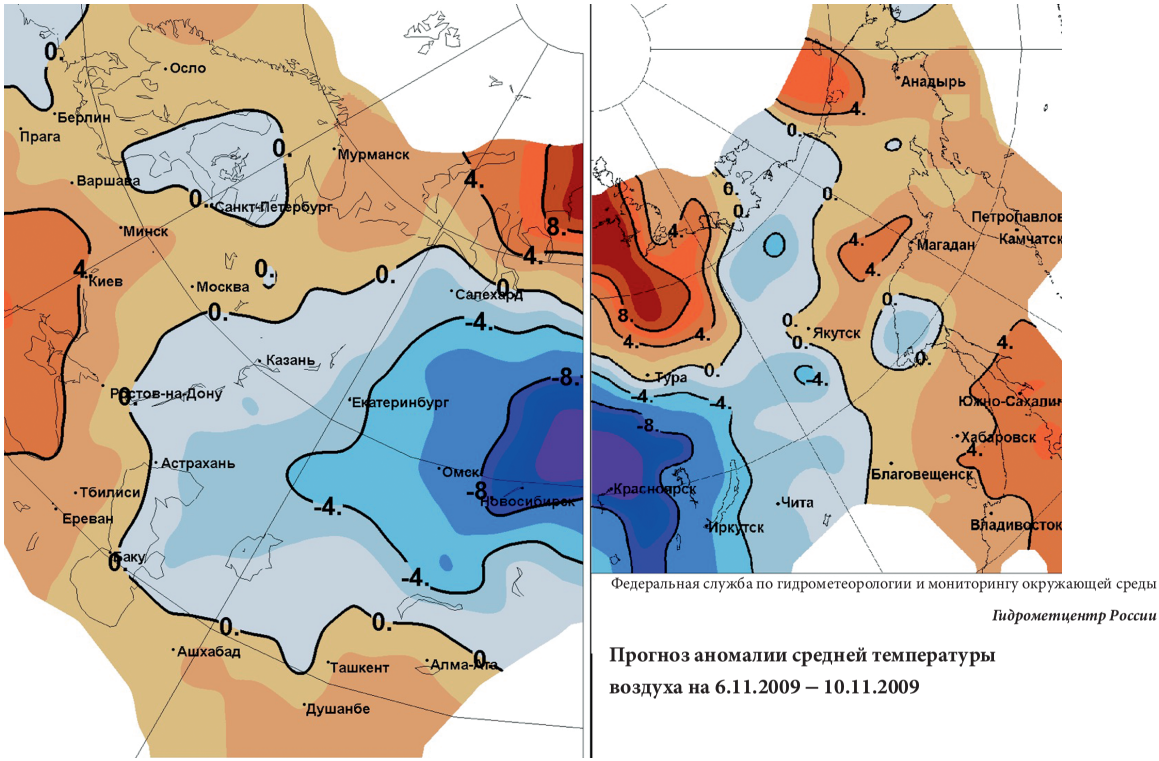


Рис. 2б. Фактическая аномалия температуры воздуха за 8 ноября 2009 г.

13.01.2010 13:14:58



Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Гидрометцентр России

Прогноз аномалии средней температуры воздуха на 6.11.2009 – 10.11.2009

Рис. 3а. Прогноз аномалии температуры воздуха, средней на 6—10 ноября 2009 г. по исходным данным 3 ноября 2009 г.

Book_Gidromet.indb 333
13.01.2010 13:14:59

Book_Gidromet.indb 334

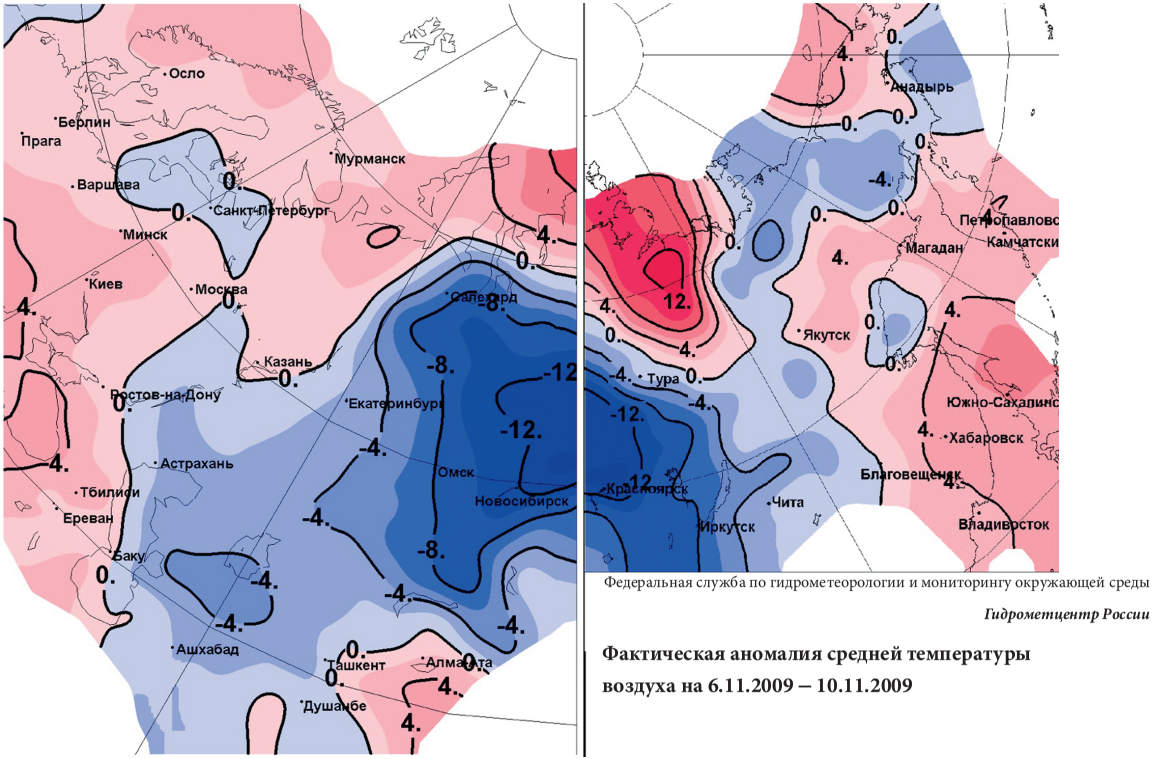


Рис. 3б. Фактическая аномалия температуры воздуха, средней за 6—10 ноября 2009 г.

13.01.2010 13:15:01

за декаду температуры воздуха также для января и октября 2009 г. в сравнении с инерцией.

Для иллюстрации метода прогноза ОЯ аномально-холодной погоды – приведены карты прогностических и фактических аномалий температуры воздуха (рис. 2а и 2б) на 8 ноября 2009 г. и карты прогностической и фактической средней за пентаду аномалии температуры воздуха (рис. 3а и 3б) на 6—10 ноября 2009 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Васильев П.П.* Среднесрочный прогноз температуры воздуха и осадков по территории Евразии // Метеорология и гидрология, 1991, № 2. С. 13—23.
2. *Лбов Г.С.* Выбор эффективности системы зависимых признаков // Сб. трудов Института математики СО АН СССР, 1965, вып. 19. С. 21—33.
3. *Лбов Г.С.* О представительности выборки при выборе эффективной системы признаков // Сб. трудов Института математики СО АН СССР, 1966, вып. 22. С. 39—51.
4. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. РД52.88.699-2008, М., 2008. 33 с.
5. *Glan H.R.* Computer worded forecasts // BAMS, 1979, № 60. P. 242—253.
6. *Lemcke C., Kruizinga S.* Model output statistics forecasts: three years of operational experience in the Netherlands // Mon. Wea. Rew., 1988, № 116. P. 1077—1090.

Модель переноса примесей

И.В. Тросников
Гидрометцентр России

Введение

Ежегодно в тропической зоне при пожарах выделяется 0,8—4,7 Pg (1 Pg = 10^{12} г) углекислого газа [Crutzen and Andreae, 1990]. В настоящее время в глобальном масштабе горение биомассы признается как главный источник CO_2, различных парниковых газов и аэрозоля [5]. Возникновение пожаров главным образом связано с человеком. Например, с его хозяйственной деятельностью по уничтожению растительности в Амазонии и других тропических регионах [Kaufman et al., 1989, 1990], или при неосторожном использовании огня в лесных массивах средних широт.

Глобальное распределение примесей, выбрасываемых в атмосферу при пожарах, а также другими процессами, крайне неоднородно, что демонстрирует рис. 1. На рисунке показано глобальное среднемесячное распределение оптической толщины на 0,55 мкм для мелкодисперсного (слева) и крупнодисперсного (справа) аэрозоля, полученное в сентябре 2000 г. с искусственного спутника NASA Terra. Показанная слева оптическая толщина в основном (особенно в тропической зоне) связана с мелкодисперсным аэрозолем продуктов горения биомассы. Справа распределение оптической толщины

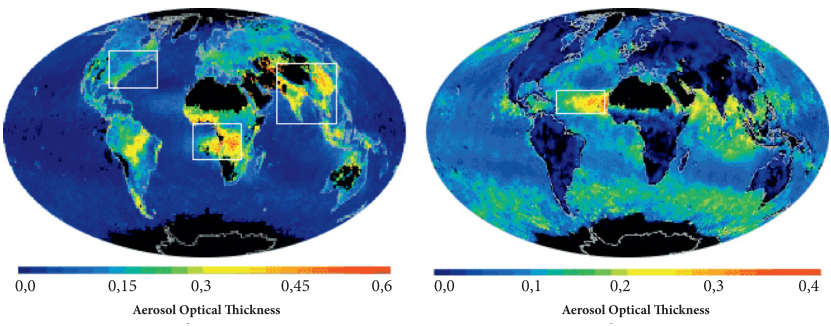


Рис. 1. Глобальное среднемесячное распределение оптической толщины на 0,55 мкм для мелкодисперсного (слева) и крупнодисперсного (справа) аэрозоля, полученное в сентябре 2000 г. с искусственного спутника NASA Terra.

Book_Gidromet.indb 336 13.01.2010 13:15:02

определяется пылевым аэрозолем, песчаными частицами, поднятыми с поверхности ветром.

Перенос примесей в атмосфере

Для многих задач метеорологии атмосферу следует рассматривать как систему, состоящую из нескольких компонент. Для наших целей достаточно принять во внимание три компоненты: сухой воздух с плотностью ρ_d, водяной пар с плотностью ρ_v и аэрозоль с плотностью ρ_a. Пусть i-я компонента с плотностью ρ_i переносится полем со скоростью V_i и турбулентным потоком T_i — тогда i-я компонента переносится полным потоком:

$$J_i = \rho_i V_i + T_i.$$

Если ввести скорость центра масс (барицентрическую скорость) V всех компонент и суммарную плотность ρ, то полный поток можно переписать как:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{3} \rho_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^{3} \rho_i}, \quad \rho = \sum_{i=1}^{3} \rho_i \qquad (1)$$

Обозначим через σ_v производство водяного пара в единицу времени и в единице объема, а через σ_a — производство аэрозоля, тогда уравнение баланса примет вид:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d V + \rho_d \Delta_d) = 0, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v V + \rho_v \Delta_v + \gamma_v) = \sigma_v, \qquad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a V + \rho_a \Delta_a + \gamma_a) = \sigma_a. \qquad (4)$$

В (2) мы пренебрегаем турбулентностью и эффектами изменения плотности сухого воздуха, а также его источниками.

Учитывая, что $\rho_d >> \rho_v + \rho_a$, а также то, что скорость переноса водяного пара и аэрозоля могут лишь незначительно отличаться от скорости сухого воздуха, получаем:

$$V = V_d.$$

Book_Gidromet.indb 337 13.01.2010 13:15:03

Это равенство скоростей в дальнейшем будет использоваться без оговорок. Уравнения (3) и (4) удобно переписать, введя удельную концентрацию водяного пара $q = \rho_v / \rho_d$ и аэрозоля $\mu = \rho_a / \rho_d$:

$$\frac{\partial \rho_d q}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d q V + \rho_d q \Delta_v + \gamma_v) = \sigma_v, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho_d \mu}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \mu V + \rho_d \mu \Delta_a + \gamma_a) = \sigma_a. \tag{6}$$

Модель

Для мониторинга и прогноза распространения аэрозоля при горении биомассы используется совместная модель, состоящая из конечно-разностной атмосферной модели ETA и полулагранжевой модели переноса примесей. Атмосферная модель используется для вычисления метеорологических параметров, определяющих динамику переноса, таких, как поле ветра, характеристики турбулентности, а также осадки, способствующие вымыванию аэрозоля из атмосферы.

Выбор атмосферной модели ETA для вычисления атмосферных параметров связан с тем, что в модели используется вертикальная координата η, введенная Мезингером [7]. Эта вертикальная координата позволяет корректно учитывать орографические эффекты, влияющие на вертикальное движение воздуха, что в свою очередь, приводит к более точному прогнозу осадков. С осадками же связан процесс вымывания аэрозоля из атмосферы.

Транспортная модель основана на трехмерной лагранжевой форме уравнения переноса (6) [3]. Для совместимости ее с моделью ETA в ней используются теже вертикальные и горизонтальные координаты.

Уравнения модели записаны в сферической системе координат, которая, однако, повернута относительно стандартной так, что через центр области интегрирования проходит экватор и нулевой меридиан. Это позволяет провести более регулярное покрытие области равномерной сеткой.

Вертикальная координата η определяется как:

$$\eta \equiv \eta_s \sigma, \tag{7}$$

$$\sigma \equiv \frac{p}{p_s}, \quad \eta_s \equiv \frac{p_{ref}(z_s)}{p_{ref}(0)},$$

Book_Gidromet.indb 338 13.01.2010 13:15:03

где профиль стандартного давления задается следующим:

$$P_{ref} \equiv \frac{P_{ref}(0)}{P_{ref}^{g/\gamma_{ref}R}}(T_{ref} - \gamma_{ref} z)^{g/\gamma_{ref}R} \tag{8}$$

при стандартной температуре на уровне моря T_{ref} = 288 K (т.е. при $\eta = 1$) и при постоянном вертикальном градиенте температуры $\Gamma_{ref} = 6{,}5\ 10^{-3}$ K м$^{-1}$.

Уравнение переноса примеси:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\eta} K_{\text{н}} \frac{\partial\mu}{\partial\eta} + \frac{S_{\mu}}{\rho}, \tag{9}$$

где d/dt — материальная производная

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\lambda} + \frac{v}{a}\frac{\partial}{\partial\varphi} + \eta\frac{\partial}{\partial\eta},$$

a — радиус Земли, μ — отношение смеси аэрозоля с плотностью ρ_{μ}, ρ — плотность сухого воздуха, K_H — коэффициент вертикальной турбулентности, S_{μ} — источниковый член.

При полулагранжевом методе интегрирования (9) на первом этапе необходимо определить траектории частиц, пришедших в каждую точки сетки модели: точки, в которых эти частицы находились в момент $t - \Delta t$.

Они определяются решением уравнений:

$$\frac{dX}{dt} = V, \tag{10}$$

где $X=(x,y,\eta)$ радиус-вектор воздушной частицы, а $V=(u,v,\eta)$ — скорость ветра в этой точке. Уравнение (10) интегрируется при начальных условиях:

$$X(t) = X_a, \tag{11}$$

где X_a — точка прибытия воздушной частицы, т.е. точка модельной сетки. Система интегрируется по схеме Кранка-Никольсона [13]:

$$X_d(t - \Delta t) = X_a(t) - \frac{\Delta t}{2}(V_a(t) + V_d(t - \Delta t)), \tag{12}$$

где Δt — шаг по времени. Индекс a относится к известным точкам прибытия воздушных частиц, индекс d — к неизвестным точкам отправления, которые могут быть определены итерациями. Второй этап вычисления состоит в вычислении отношения смеси в точке от-

Book_Gidromet.indb 339 13.01.2010 13:15:04

правления воздушной частицы и поправки этого значения на источник в точке прибытия воздушной частицы (точка сетки):

$$\mu_a(t) = \mu_d(t - \Delta t) + \frac{\Delta t S_\mu}{\rho}. \qquad (13)$$

Неизвестные значения компонент поля ветра, параметров диффузии и значения отношения смеси аэрозоля в точке отправления получаются с помощью квази-монотонной, локальной, кубической сплайн-интерполяции [2].

В транспортной модели используются следующие граничные условия:

– через внешнюю границу приток аэрозоля отсутствует;

– на внутренних орографических границах, где поток воздуха отсутствует, поток аэрозоля также отсутствует;

– на поверхности поток аэрозоля вычисляется исходя из распределения очагов пожаров, их площади и характера горящей растительности;

– на верхней границе поток аэрозоля равен нулю.

Член источников $S\mu$ включает процессы вымывания аэрозоля осадками — скорость которого задается:

$$R = S\frac{dP}{dt}, \qquad (14)$$

где dP/dt — интенсивность осадков (в см/ч), и S=1 $см^{-1}$.

Интерполяция

Хорошо известно, что при лагранжевом, или как в нашем случае полулагранжевом, методе интегрирования уравнения переноса значительно ослабляется условие на соотношение шагов по пространству и времени. В этом методе, как правило, для устойчивого счета допускаются значительно большие шаги по времени по сравнению с эйлеровым подходом. В то же время требуется точные методы многомерной интерполяции. В модели переноса для этой цели используется тензорное произведение одномерных интерполяций. В одномерном случае рассмотрим два типа интерполяции: линейную и кубическую. На рисунке

```
f1              f2
x1--x-----------x2
```


Book_Gidromet.indb 340 13.01.2010 13:15:05

на интервале [x_1,x_2] заданными значениями функции на концах f_1 и f_2 при линейной зависимости $f(x) = a\,x + b$ получаем интерполяционную формулу для любого x\in [*x_1,x_2*]:

$$f(x) = f_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(f_2 - f_1)$$

Для получения кубической интерполяции число узлов с заданными значениями функции следует увеличить:

```
f1      f2      f3      f4
x1-----x2----x-x3------x4
        f'2     f'3
```

Тогда кубическая интерполяция на интервале [x_2,x_3] задается полиномом третьей степени:

$$f(x) = a(x - x_2)^3 + b(x - x_2)^2 + c(x - x_2) + d,$$

где $x \in [x_2, x_3]$. Легко вычислить производную $f'(x)$:

$$f'(x) = 3a(x - x_2)^2 + 2b(x - x_2) + c.$$

Если производные на концах интервала [x_2,x_3] оценить, используя конечные разности [13], получим четыре условия для определения коэффициентов полинома кубической интерполяции, которая является более точной по сравнению с линейной. К сожалению, такая интерполяция немонотонна, что может приводить к паразитарным осцилляциям. Для подавления этого эффекта используется метод, предложенный в работе [2].

Сохранение массы аэрозоля

Для сохранения массы аэрозоля при адвентивном переносе, что является обязательным условием, применяется алгоритм основанный на идее коррекции потоков (the flux corrected transport — FCT), предложенный Пристли [9]. Идея состоит в том, что при расчете переноса аэрозоля при условии отсутствия потоков на границах для двух временных моментов t и $t - \Delta t$ требуется сохранение интеграла массы аэрозоля:

$$\int_V \chi^M(t)\rho(t)\,dx\,dy\,dz = C,$$

Book_Gidromet.indb 341 13.01.2010 13:15:05

где χ^M — решение уравнения переноса, получаемое для каждой точки сетки из линейной комбинации решений χ^H, вычисляемого с использованием интерполяции высокого порядка (кубической) и χ^L, получаемой по линейной интерполяции:

$$\mu_k^M = \alpha_k \mu_k^H + (1-\alpha_k)\mu_k^L$$
$$0 \le \alpha_k \le 1.$$

В статье Пристли предлагается также эффективный алгоритм нахождения α_k путем минимизации различия между χ^M и χ^H.

Параметризация источников

Данные о локализации очагов пожаров, получаемые при оперативном мониторинге с орбитальных спутников NOAA, сохраняются в базе Национального Института Космических Исследований Бразилии INPE (Brazil) и покрывают всю Южную Америку несколькими треками (3—5) в течение суток. Чтобы конвертировать эти данные в массу аэрозоля, выбрасываемую в атмосферу, необходимо оценить среднюю площадь одного пожара и как она меняется в течение суток. Это было сделано по данным о пожарах, получаемых со стационарных спутников, которые кроме локализации пожаров определяют и площади. Средние значения приводятся в таблице 1. Следует обратить внимание на суточный ход приведенных величин, впервые обнаруженный Принс [Prins et al. 1992].

Таблица 1

Средняя площадь пожаров

Время	Число случаев	Общая площадь км^2	Средняя площадь одного пожара км^2
11:45	10	0,958	0,0958
14:45	8	1,401	0,1401
17:45	9	0,989	0,0989
20:45	10	0,432	0,0432

Для имитации суточного хода пожаров все данные о пожарах в течение суток разделялись на две части: данные с треков до полудня (1—2 трека) и данные после полудня (2—3 трека). Средняя площадь пожара задавалась согласно таблице 2.

Book_Gidromet.indb 342 13.01.2010 13:15:05

Таблица 2

Средняя площадь одного пожара, $\Delta S = 0{,}1$ км^2

Период	Средняя площадь пожара
00:00 – 06:00	0,47 ΔS
06:00 – 12:00	0,53 ΔS
12:00 – 18:00	0,56 ΔS
18:00 – 24:00	0,44 ΔS

Интенсивность аэрозольных выбросов в ячейке на модельной сетке S_0 вычисляется из соотношения:

$$S_0 = S_f \frac{A_f}{A_g},$$

где S_f — интенсивность выброса аэрозоля с поверхности, зависящая от типа горящей растительности, A_f — площадь пожаров в модельной ячейке с площадью A_g.

Интенсивность аэрозольных выбросов в зависимости от типа растительности представлена в таблице 3.

Таблица 3

Выброс аэрозоля в атмосферу при горении различных типов растительности

Тип растительности	Поток аэрозоля, кг м$^{-2}$ с$^{-1}$
Лес	$0{,}206\times10^{-3}$
Степь	$0{,}903\times10^{-6}$
Другие	$0{,}580\times 10^{-4}$

Совместная модель

Для вычисления переноса примесей в атмосфере необходимо знать трехмерное поле ветра, температуру, геопотенциал, осадки и параметры вертикальной турбулентности. Эти элементы получаются из мезомасштабной атмосферной модели. Для этой цели используется модель ETA с пространственным шагом около 30 км и 45 уровнями по вертикали. При интегрировании атмосферной модели с шагом

Book_Gidromet.indb 343 13.01.2010 13:15:06

96 с через каждые 48 мин модельного времени включается модель переноса, в которой используются текущие атмосферные параметры для вычисления эволюции аэрозоля за истекший период времени. После этого счет атмосферной части продолжается.

Совместная модель атмосферы и переноса аэрозоля

Совместная модель атмосферы и переноса аэрозоля была создана для мониторинга распространения продуктов горения биомассы над территорией Южной Америки. На рис. 2 схема информацион-

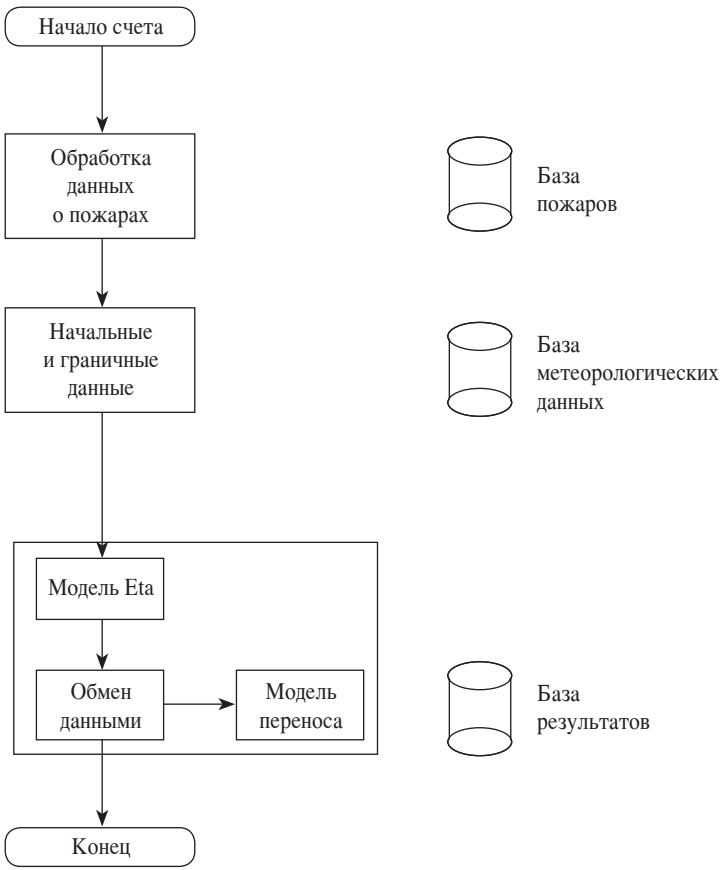


Рис. 2. Блок-схема совместной модели атмосферы и переноса аэрозоля.

Book_Gidromet.indb 344 13.01.2010 13:15:06

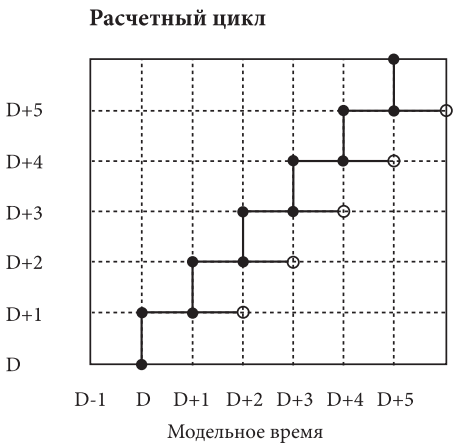


Рис. 3. Схема мониторинга и прогноза по совместной модели.

ного обеспечения и функционирования совместной модели. Распределение пожаров за прошедшие сутки, полученное с орбитальных ИСЗ, и хранимое в локальной базе на дисках, обрабатывается для привязки к сетке модели. Вторым источником информации являются глобальные анализы и прогнозы NCEP. Эти данные также используются для формирования начальных данных на сетке модели (анализ) и граничных условий (прогноз). После этого начинается синхронное интегрирование атмосферной модели и модели переноса.

На рис. 3 представлена схема ежедневного счета совместной модели. На оси абсцисс указано модельное время в днях (D), а на ординате — реальное время. В таком цикле для каждого реального дня проводился расчет переноса аэрозоля за предыдущие сутки, так как за эти сутки известно распределение очагов пожаров. В качестве начального распределения аэрозоля используется результат предыдущего расчета. Это мы называем мониторингом распространения аэрозоля. Продолжение расчета на следующие модельные сутки является прогнозом, так как это время еще не наступило.

Такой цикл можно начинать с отсутствия аэрозоля в атмосфере. Учитывая, что время жизни в атмосфере такого аэрозоля составляет несколько суток, то после повторения цикла расчетов распределение примесей определяется только распределением пожаров, а не начальным состоянием, с которого этот процесс начался.

Book_Gidromet.indb 345 13.01.2010 13:15:07

Некоторые результаты мониторинга

С 2000 года совместная модель атмосферы и переноса аэрозоля использовалась для мониторинга распространения над Южной Америкой аэрозоля от горения биомассы. На рис. 4 показан ход интегральных характеристик выбросов аэрозоля в атмосферу при горении биомассы в Южной Америке с июля по октябрь 2000 г. 4a показывает массу аэрозоля, добавленную в атмосферу на каждом шаге (48 мин) интегрирования. На 4b показан ход аккумулированной массы выбросов аэрозоля в атмосферу (Тг).

Для этого же периода на рис. 5 показана осредненная по площади области интегрирования модели концентрация аэрозоля в мкг/м^3 для разных уровней.

Пространственное распределение концентрации аэрозоля на поверхности 925 гПа для конкретного времени 24.07.2001 12 ГСТ

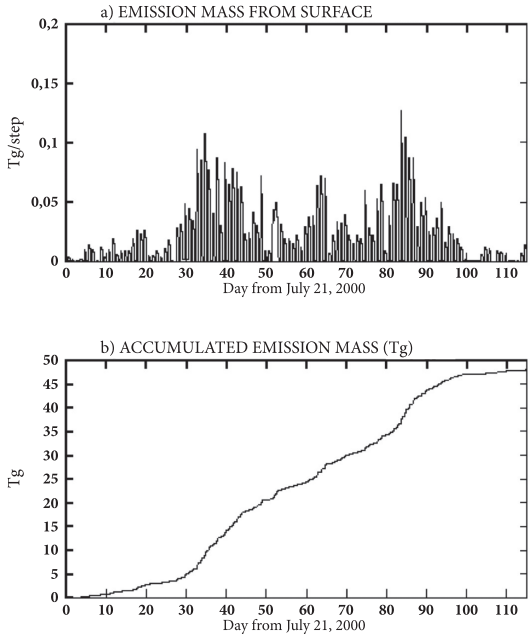


Рис. 4. Выбросы аэрозоля в атмосферу при горении биомассы в Южной Америке с июля по октябрь 2000 г.: a) масса аэрозоля, добавленная в атмосферу (Тг/48 мин); b) аккумулированная масса выбросов аэрозоля в атмосферу (Тг).

Book_Gidromet.indb 346 13.01.2010 13:15:07

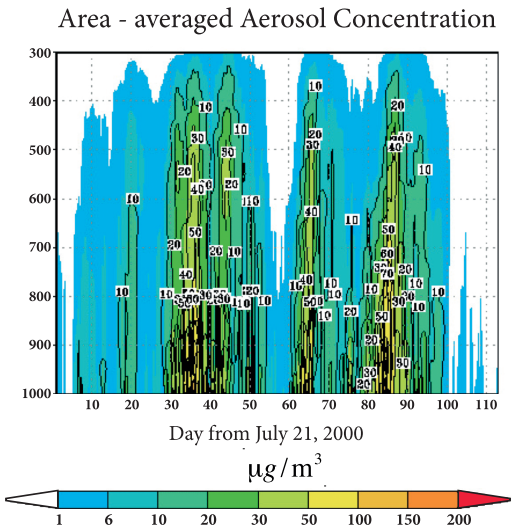


Рис. 5. Осредненная по площади концентрация аэрозоля в мкг/м^3 в Южной Америке с июля по октябрь 2000 г.

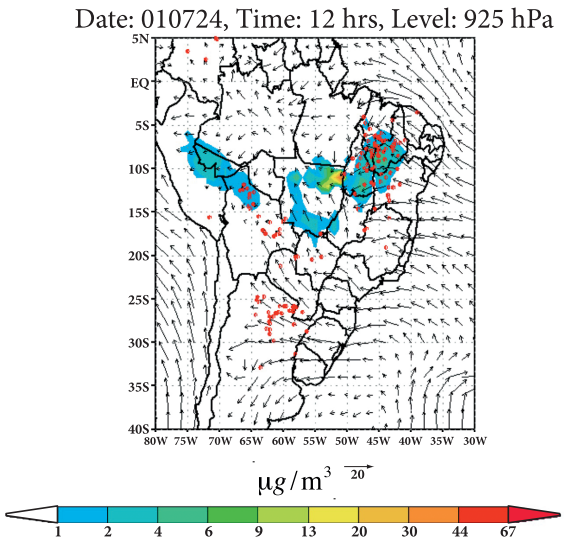


Рис. 6. Распределение концентрации аэрозоля на поверхности 925 гПа 24.07.2001 12 ГСТ. Очаги пожаров отмечены красными точками.

показано на рис. 6. Здесь же отмечены красными точками очаги пожаров.

На рис. 7 можно видеть изменение концентрации аэрозоля на уровне 925 гПа для трех моментов времени 00Z, 12Z и 24Z при мониторинге за 29.09.2002. Первое из этих распределений получили при расчетах по данным за 28.09.2002. Третье распределение было использовано для продолжения мониторинга по данным за 30.09.2002. Наблюдаемая картина распределения концентрации аэрозоля является следствием атмосферного ветра, вертикальной турбулентности и вымывания аэрозоля осадками. Вертикальная турбулентность является тем механизмом, который переносит продукты сгорания из приземного слоя в верхние слои атмосферы.

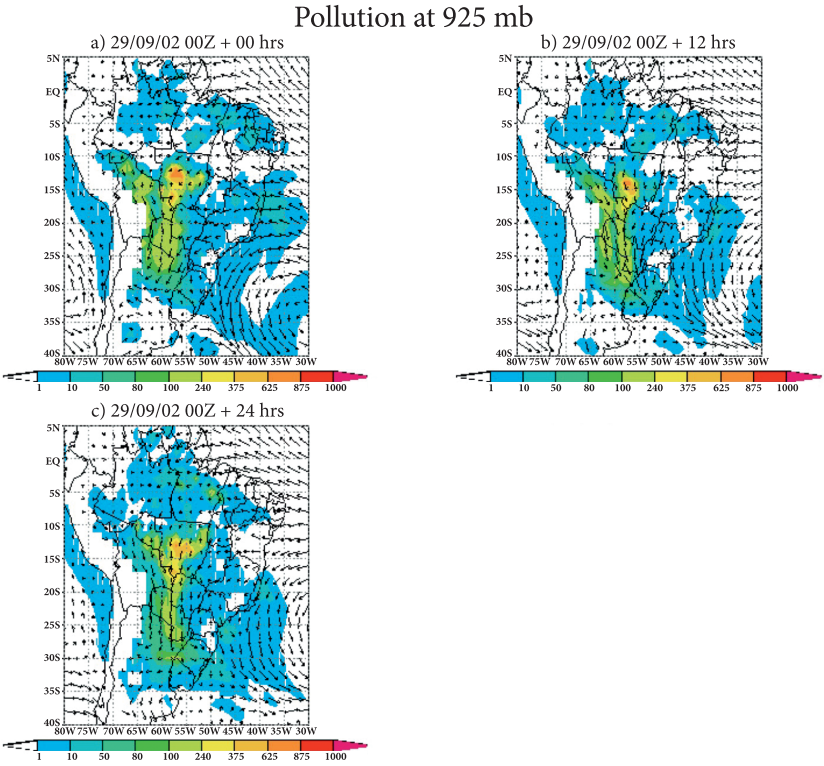


Рис. 7. Мониторинг концентрации аэрозоля на уровне 925 гПа за 29.09.2002 для трех моментов времени 00Z, 12Z и 24Z.

Book_Gidromet.indb 348 13.01.2010 13:15:08

Заключение

В настоящее время отсутствует адекватная система наблюдений за распределением аэрозоля в атмосфере. Например, в существующей системе AERONET на территории России имеется только две станции. Это метеорологическая обсерватория МГУ и еще одна в Красноярске. В такой ситуации численные модели переноса совместно с атмосферными моделями являются альтернативным инструментом для решения как практических, так и исследовательских задач распространения атмосферных примесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Artaxo P., Gerab F., Yamasoe M.A., Martins J.V., Longo K.M., Echalar F.* Long term measurement of aerosol composition at three monitoring sites in the Amazon basin, SCAR-B Proceedings, 1996. P. 15—21.
2. *Bermejo R., Staniforth A.* The conversion of semi-Lagrangian advection schemes to quasi-monotone schemes // Monthly Weather Review, 1992, 120. P. 2622—2632.
3. *Brasseur G.P., Madronich S.* Chemistry-transport models. in Climate system modeling, edited by K. E. Tremberth // Chapter 15, Cambridge, University Press, 1992.
4. *Echalar F., Artaxo P., Martins J.V., Yamasoe M., Gerab F., Maenhaut W., Holben B.* Long-term monitoring of atmospheric aerosols in the Amazon Basin: Source identification and apportionoment // Journal Geophysical Review, 103, No. D24, 1998. P. 31849—31864.
5. *Hao W.M., Liu M.H., Crutzen P.J.* Estimates of annual and regional release of CO$_2$ and other trace gases to the atmosphere from fires in the tropics, based on the FAO statistics for the period 1975—1980. In Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges, edited by J.G. Goldammer. *Ecological Studies* 82, 440—462. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.
6. *Kaufman Y.J., A. Setzer, D. Ward, D. Tanre, B.N. Holben, P. Menzel, M.C. Pereira, R.* Rasmussen. Biomass Burning Airborne and Spaceborne Experiment in the Amazonas (BASE-A) // Journal Geophysical Review, 97, No. D13, 1992. P. 14,581—14,599.
7. *Mesinger F.* A blocking technique for representation of mountains in atmospheric model // Riv. Meteor. Aeronaut., 44, 1984. P. 195—202.
8. *Penner J.E., Ghan S.J., Walton J.J.* The role of biomass burning in the budget and cycle of carbonaceous soot aerosols and their climate impact, in Global biomass burning: atmospheric, climate, and biospheric implication, edited by J. S. Levine // The MIT Press, 1991. P. 387—393.
9. *Priestley A.* A quasi-conservative version of the semi-Lagrangian advection scheme // J. Atmos. Sci., vol. 121, 1993. P. 621—629.
10. *Prins E.M., Feltz J.M., Menzel W.P., Ward D.E.* Large-scale aerosol apportionment in Amazonia // J. Atmos. Sci , 103, No. D24, 1998. P. 31821—31835.
11. *Trosnikov I.V., Nobre C.A.* Estimation of aerosol transport from biomass burning areas during the SCAR-B experiment // J. Geoph. Res., 103, No. D24, 1998. P. 32129—32137.
12. *Ward D.E., Susott R.A., Kauffman J.B., Babbit R.E., Cumming D.L., Dias B., Holben B.N., Kaufman Y.J., Rasmussen R.A., Setzer A.W.* Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B experiment // Journal Geophysical Review, 97, No. D13, 1992. P. 14,601—14,619.
13. *Williamson D., Rasch P.* Two dimensional semi-Lagrangian transport with shape-preserving interpolation // Mon. Wea. Rev., 117, 1989. P. 102—109,

Развитие моделей и методов анализа данных наблюдений для мониторинга и прогнозирования крупномасштабных процессов в океане

Ю.Д. Реснянский, А.А. Зеленько
Гидрометцентр России

1. Введение

Характерным свойством океана как жидкой среды и важнейшей составной части климатической системы являются непрерывные движения его вод. Эти движения включают широкий диапазон пространственно-временных масштабов (классификация нестационарных процессов в океане приведена, например, в [20]). Наиболее крупные из масштабов движения — океанские течения, такие как Гольфстрим, Куросио, Североатлантическое, Антарктическое циркумполярное, субтропические антициклонические и субполярные циклонические круговороты, зональные струи системы экваториальных течений, переносят воды на многие тысячи километров. Трехмерная океаническая циркуляция, наиболее примечательным элементом которой является так называемая конвейерная лента [13, 11, 39], имеет глобальный масштаб, охватывая все океанические бассейны. Движения вод океана сопровождаются переносом тепла, солей, содержащихся в воде химических примесей и загрязнений. Тем самым течения в сочетании с другими океаническими процессами оказывают существенное влияние не только на климат Земли и изменения погоды, но и на экологическую обстановку.

В данной статье рассматривается развитие моделей и методов анализа данных наблюдений в контексте их использования в оперативных информационно-прогностических системах. Разработка численных моделей общей циркуляции океана относится к числу важнейших задач в проблематике океанологических исследований и исследований климатической системы в целом. Численные модели общей циркуляции атмосферы и океана, развивавшиеся вначале как метод теоретических исследований по геофизической гидродинамике, все чаще становятся средством решения практических задач. Приложения таких моделей составляют основу современных подходов к прогнозированию погоды и состояния морской среды, к предсказанию межгодовых вариаций системы «атмосфера — океан»

Book_Gidromet.indb 350 13.01.2010 13:15:09

(таких как Эль-Ниньо–Южное колебание), получению оценок возможного потепления климата вследствие изменения концентрации парниковых газов и др. Для использования этих моделей в качестве прогностического инструмента необходимо, в свою очередь, иметь начальное состояние океанографических полей. Определение такого состояния базируется на совмещении данных наблюдений с результатами расчетов по моделям, осуществляемом в рамках систем усвоения данных.

В соответствии с этим, в статье сначала дается краткий обзор известных подходов к моделированию крупномасштабных процессов в океане, приводятся основные сведения о конкретной модели, разработанной в Гидрометцентре России, а затем рассматривается строящаяся на этой модели система усвоения данных и получаемая с ее помощью продукция.

2. Предшественники современных численных моделей — упрощенные теоретические модели

Современные численные модели общей циркуляции океана являются результатом развития упрощенных теоретических моделей, применимых при выполнении определенных допущений. В ходе их изучения в прошлом веке заложены основы понимания главных закономерностей, управляющих формированием океанских движений, и получено объяснение наблюдающихся в природе крупномасштабных особенностей распределения гидрологических полей и структуры океанских течений:

1. Экмановская теория ветровых течений в однородном океане [47], объясняющая вращение вектора скорости течения с глубиной и его поворот относительно вектора касательного напряжения ветра у поверхности.

2. Теория Свердрупа [63], объясняющая связь крупномасштабных переносов в центральных и восточных частях океанов с вихрем напряжения ветра с учетом бета-эффекта (т.е. изменения параметра Кориолиса с широтой).

3. Двумерные модели ветровых течений — метод полных потоков [33]; объяснение на их основе механизма возникновения поверхностных межпассатных противотечений вследствие неравномерности поля касательного напряжения ветра [34] и западной интенсификации океанических круговоротов под действием бета-эффекта [62, 55].

Book_Gidromet.indb 351 13.01.2010 13:15:10

4. Теория главного океанского термоклина [15, 16, 68, 67, 17], объясняющая формирование вертикальной структуры течений в бароклинном слое океана.

5. Теория глубинных экваториальных противотечений [22, 29, 10], предлагающая объяснение структуры течений вблизи экватора.

С указанных теоретических моделей начиналось становление классической динамической океанографии как самостоятельной дисциплины в начале и середине XX века. Среди подобных моделей выделяется так называемый динамический метод расчета течений, оказавшийся весьма плодотворным для описания общей картины океанической циркуляции.

Динамический метод, введенный в 1898 г. Бьеркнесом в метеорологии, был перенесен в океанографию Сандстремом и Хелланд-Хансеном [59], (а также см. [6]). Метод базируется на предположениях о том, что движение является квазистационарным, и баланс ускорений для горизонтальных составляющих движения определяется силами градиента давления и Кориолиса. Течение, имеющее место при выполнении указанных предположений, так же как и в метеорологии, называется геострофическим. Принятые предположения справедливы для сравнительно медленных движений (число Кибеля-Россби $Ki = U/(fL) << 1$, f — параметр Кориолиса, U — характерная скорость, L — характерный масштаб) при отсутствии (или относительной малости) внешних сил и сил трения. Эти предположения выполняются вне приэкваториальной зоны (в которой $f \to 0$) за пределами пограничных слоев (прибрежных, придонных, поверхностных, где существенна роль трения), вплоть до горизонтальных масштабов $L \sim 10$—50 *км* (при $U \sim 0.1...1$ $м \cdot с^{-1}$), т.е. вплоть до океанских синоптических вихрей с характерными размерами в несколько десятков километров.

Расчет течений динамическим методом сводится к определению наклонов соответствующей изобарической поверхности, определяемых по распределению плотности воды. Важно заметить, что получаемые скорости течений представляют собой не абсолютные, а относительные значения скорости на изобарической поверхности p относительно отсчетной изобарической поверхности p_0. Абсолютные значения можно восстановить, лишь имея информацию — прямую или косвенную — о течениях на отсчетном уровне p_0.

С этим связана проблема выбора так называемой «нулевой поверхности», т.е. поверхности, на которой горизонтальный градиент

Book_Gidromet.indb 352 13.01.2010 13:15:10

давления равен нулю, и геострофические течения отсутствуют. Это чисто океанографическая проблема, не имеющая метеорологического аналога, так как сеть приземных и высотных метеорологических наблюдений позволяет восстановить абсолютные значения давления как у поверхности земли, так и на разных высотах в атмосфере.

3. Основные типы численных моделей общей циркуляции океана

Первые численные модели общей циркуляции океана, так называемые «диагностические модели» [27, 44, 52], можно рассматривать как непосредственное развитие динамического метода, так как в этих моделях течения рассчитываются по заданным распределениям температуры воды T и ее солености S. Но использование более общих, чем в динамическом методе, уравнений движения исключает необходимость априорного задания нулевой поверхности.

Основу современных моделей общей циркуляции океана (МОЦО) составляют уравнения гидротермодинамики: сохранения импульса (ньютоновский закон движения), сохранения массы, диффузии соли, переноса энтропии и уравнение состояния морской воды, записываемые, как правило, в сферической системе координат для осредненных (по отношению к турбулентным пульсациям) величин.

С учетом геометрических особенностей крупномасштабных движений (больших различий горизонтальных и вертикальных масштабов) и термодинамических свойств воды (ее слабой сжимаемости и малости относительных изменений плотности) принимается ряд приближений, фильтрующих несущественные для крупномасштабной динамики типы движений и слабо искажающие интересующие нас крупномасштабные движения (Буссинеска, квазистатики, замена уравнения переноса энтропии уравнением теплопроводности для движущейся среды) (см., напр., [8]). Дополнительная фильтрация некоторых типов движения, несущественных для крупномасштабной динамики океана, осуществляется выбором приближенных форм граничных условий на поверхности океана.

Конечномерное представление вертикальной структуры осуществляется путем введения набора слоев, различающихся по плотности воды (изопикнические модели; [56]; их разновидность — квазиизопикнические модели; см., например, [32]) или набора уровней с фиксированными границами (z–модели). Последний тип моделей более распространен [40, 44, 2]. Сравнение двух этих типов проводится

Book_Gidromet.indb 353 13.01.2010 13:15:11

в [42]. Привлекательным свойством изопикнических моделей является их способность воспроизводить анизотропию турбулентного перемешивания вдоль и поперек изопикнических поверхностей. Впрочем, и в z-моделях такая анизотропия может быть учтена путем использования специального преобразования тензора диффузии для ориентации перемешивания преимущественно вдоль изопикнических поверхностей [49].

Спектр разнообразных приложений МОЦО чрезвычайно широк. Даже простое перечисление всех основных результатов заняло бы слишком много места. Информативная сводка основных результатов, полученных к середине 90-х гг., содержится в [60]. Обзоры работ по моделированию МОЦО в связи с исследованиями климата опубликованы в [30, 1, 70]. В монографиях [28, 9, 12, 19] обобщены результаты отечественных исследований. Применение моделей для решения задач оперативной океанографии описывается в [57].

4. Модель общей циркуляции океана Гидрометцентра России

4.1. Основные уравнения

Основные уравнения модели в сферической системе координат (λ — географическая долгота, φ — широта, z — вертикальная координата, направленная вниз, с началом отсчета на невозмущенной поверхности воды) с учетом предположений, перечисленных в предыдущем разделе, записываются следующим образом [25, 4]:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+L_a u-\frac{uv\ \mathrm{tg}\,\phi}{a}-fv=-\frac{1}{\rho_r a\cos\phi}\frac{\partial p}{\partial\lambda}+\mu\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+$$
$$+A_M\left[\nabla^2 u+\frac{(1-\mathrm{tg}^2\phi)u}{a^2}-\frac{2\sin\phi}{a^2\cos^2\phi}\frac{\partial v}{\partial\lambda}\right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+L_a v+\frac{u^2\,\mathrm{tg}\,\phi}{a}+fu=-\frac{1}{\rho_r a}\frac{\partial p}{\partial\phi}+\mu\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}+$$
$$+A_M\left[\nabla^2 v+\frac{(1-\mathrm{tg}^2\phi)v}{a^2}+\frac{2\sin\phi}{a^2\cos^2\phi}\frac{\partial u}{\partial\lambda}\right], \quad (2)$$

$$\partial p/\partial z=g\rho, \quad (3)$$

Book_Gidromet.indb 354 13.01.2010 13:15:11

$$\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial u}{\partial\lambda}+\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\phi}(v\cos\phi)+\frac{\partial w}{\partial z}=0\,, \tag{4}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+L_a T=\kappa\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+A_H\nabla^2 T\,, \tag{5}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t}+L_a S=\kappa\frac{\partial^2 S}{\partial z^2}+A_H\nabla^2 S\,, \tag{6}$$

$$\rho=\rho(T,S,p)\,. \tag{7}$$

Здесь a — радиус Земли; u, v и w — компоненты скорости вдоль осей λ, ϕ и z соответственно; p — давление; ρ — плотность морской воды; ρ_r — ее стандартное значение; f — параметр Кориолиса; g — ускорение свободного падения; T – потенциальная температура воды; S — ее соленость; μ и A_M — коэффициенты соответственно вертикальной и горизонтальной турбулентной вязкости; κ и A_H — коэффициенты соответственно вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии; $L_a\alpha$ и $\nabla^2\alpha$ — операторы соответственно адвекции и горизонтальной диффузии:

$$L_a\alpha=\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\lambda}(u\alpha)+\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\phi}(v\alpha\cos\phi)+\frac{\partial}{\partial z}(w\alpha)\,, \tag{8}$$

$$\nabla^2\alpha=\frac{1}{a^2\cos^2\phi}\frac{\partial^2\alpha}{\partial\lambda^2}+\frac{1}{a^2\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\phi}\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\phi}\cos\phi\right). \tag{9}$$

Искомыми переменными служат компоненты вектора скорости движения $\mathbf{u}=(u,v,w)$, потенциальная температура воды T, ее соленость S, давление p. Независимые переменные — время t и координаты (λ, ϕ, z) в сферической системе отсчета. Уравнение термодинамики (переноса тепла в движущейся несжимаемой среде) (5) записано в терминах потенциальной температуры T. Использование потенциальной температуры вместо температуры *in situ* мотивируется тем, что потенциальная температура в большей степени аппроксимирует консервативную переменную [58, 64]. В верхних слоях океана различия между двумя температурами несущественны. Они становятся заметными лишь на больших глубинах свыше ~2000 м. В рамках рассматриваемой модели эти различия могут сказаться лишь при вычислении давления из уравнения гидростатики (3) с использо-

Book_Gidromet.indb 355 13.01.2010 13:15:11

ванием уравнения состояния морской воды (7). В качестве рабочей формулы уравнения состояния в нынешней версии модели используется аппроксимация рациональной функцией [54], построенная с учетом дополнительных экспериментальных данных и являющаяся более точной, чем наиболее популярная до недавнего времени форма ЮНЕСКО. Для краткости в дальнейшем переменная T будет называться просто «температурой».

4.2. Краевые и начальные условия

Область, в которой ищутся решения уравнений МОЦО, ограничивается поверхностью океана, $z = -\zeta(\lambda, \phi, t)$, его дном $z = H(\lambda,\phi)$, твердыми боковыми границами Γ_s, проходящими там, где H становится равным нулю, а также жидкими боковыми границами Γ_f, появляющимися в том случае, если рассматривается лишь часть Мирового океана. В общем случае область расчета является неодносвязной, имея вычленения в виде материков или островов.

Поскольку связанные с крупномасштабными движениями отклонения поверхности океана $z = -\zeta(\lambda,\phi,t)$ от ее невозмущенного положения $z = 0$ весьма малы в сравнении с характерным вертикальным масштабом (десятки сантиметров в сравнении с несколькими километрами), то формулируемые здесь граничные условия можно отнести к уровню $z = 0$, учтя это в выражении для поверхностного давления.

В качестве динамических граничных условий при z=0, вытекающих из непрерывности сил на поверхности воды, здесь задаются компоненты касательного напряжения ветра, а для вертикальной скорости ставится условие «жесткой крышки». Термодинамическая часть атмосферных воздействий выражается в виде задания при z=0 потоков тепла и пресной воды (пересчитываемого в поток соли) в сочетании с релаксацией поверхностных значений $T\big|_{z=0}$ и $S\big|_{z=0}$ к заданным распределениям T_* и S_*. Присутствие релаксационных слагаемых в этом граничном условии позволяет в смягченной форме учесть информацию о фактическом состоянии поверхности океана.

Сохранение объема воды в расчетной области обеспечивается условием обтекания на дне океана, при $z = H(\lambda,\phi)$, а тепло/солеизолирующие свойства дна выражаются условием равенства нулю вертикальных потоков тепла и соли. В качестве динамических граничных условий на дне используется условие квадратичного трения.

Book_Gidromet.indb 356 13.01.2010 13:15:12

Непроницаемость твердых береговых границ Γ_s для потоков воды, требуемая очевидными физическими соображениями, в рассматриваемой здесь модели обеспечивается условием прилипания, а непроницаемость этих границ для потоков тепла и соли выражается условием равенства нулю нормальной составляющей горизонтальных градиентов температуры и солености воды. При рассмотрении глобальной области для всех искомых переменных задается также условие периодичности (с периодом 2π по долготе λ).

Принятие условия «жесткой крышки» фильтрует быстрые поверхностные гравитационные волны, позволяя более экономично организовать вычислительный процесс. Для исключения поверхностного давления, которое в этом случае не может быть найдено непосредственно из исходных уравнений, в данном случае вводится вспомогательная функция — функция тока полных потоков ψ. Уравнение для ψ выводится из уравнений движения путем их осреднения по вертикали и применения операции вихря с учетом граничных условий для основных переменных модели.

Постановка задачи о моделировании общей циркуляции океана завершается заданием начальных условий для искомых функций:

$$(u, v, T, S, \psi)\big|_{t=0} = (u_0, v_0, T_0, S_0, \psi_0). \qquad (10)$$

Для вертикальной скорости *w* начальное условие не требуется, так как она находится из уравнения неразрывности, не содержащего производных по времени.

4.3. Параметризация верхнего перемешанного слоя и конвективное приспособление

Использование уравнений переноса тепла (5) и соли (6) для расчета температуры и солености воды с постоянными значениями коэффициента турбулентной диффузии κ дает лишь грубую оценку вертикальных распределений этих величин в верхнем слое моря. Роль мелкомасштабных процессов вертикального турбулентного перемешивания, весьма схематично описываемых К-теорией, здесь гораздо более существенна, чем в толще воды. Для более точного описания необходимо отказаться от предположения о существовании простой линейной зависимости турбулентных потоков тепла и соли от соответствующих вертикальных градиентов и определять эти потоки из дополнительных соображений.

Book_Gidromet.indb 357 13.01.2010 13:15:13

В модели Гидрометцентра России для описания процессов в верхнем слое океана используется так называемая интегральная модель, или модель верхнего перемешанного слоя (ВПС) [24, 4]. В соответствии с концепцией интегральных моделей ВПС, основывающейся на многочисленных эмпирических свидетельствах, вертикальные градиенты температуры, солености и плотности воды в пределах ВПС предполагаются настолько малыми, что ими можно пренебречь, а толщина слоя с пренебрежимо малыми вертикальными градиентами температуры и солености воды определяется из уравнения, являющегося следствием уравнения бюджета кинетической энергии турбулентности (КЭТ):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{2}{(g/\rho_r)h\Delta\rho}\left[P - \frac{h}{2}B_0\right] + w_h, \qquad (11)$$

где P — скорость преобразования КЭТ в потенциальную энергию плотностной стратификации, B_0 — вертикальный поток плавучести на поверхности океана, $\Delta\rho$ — перепад плотности в слое скачка, g — ускорение свободного падения, w_h — вертикальная скорость на нижней границе ВПС, определяемая путем интерполяции на уровень $z = h$ тех значений вертикальной скорости, которые рассчитываются в циркуляционной модели на фиксированных уровнях z_k.

В диапазоне $z \in (0, h)$ потенциальная температура и соленость воды считаются не зависящими от глубины (т.е. «перемешиваются») на каждом временном шаге. Получаемые таким образом значения h используются также для задания коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии и вязкости. Средние значения T_m и S_m определяются путем выравнивания T и S по вертикали z в пределах $z \in (0, h)$, как это показано на рис. 1.

Параметризация турбулентного перемешивания, используемая в модели, обеспечивает при определенных условиях в ходе углубления ВПС переход от режима проникающей конвекции к режиму непроникающей конвекции. Существование последнего из режимов в классе решений уравнений модели ВПС является необходимым условием для воспроизведения циклических состояний верхнего слоя океана.

Еще один механизм вертикального обмена, связанный с плотностной конвекцией, параметризуется по схеме конвективного приспособления, включающейся всякий раз, как только обнаруживаются статически неустойчивые сочетания значений плотности в соседних слоях воды.

Book_Gidromet.indb 358 13.01.2010 13:15:13

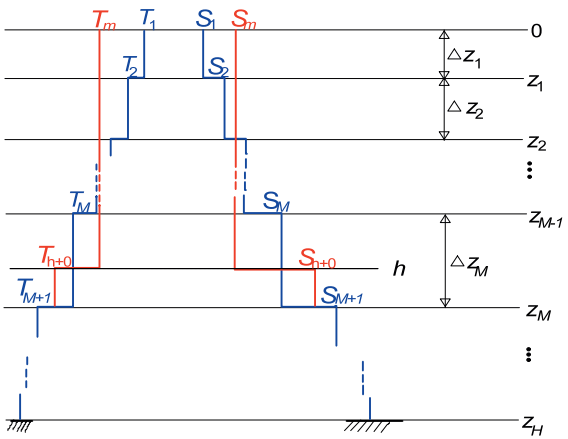


Рис. 1. Схема представления вертикальных профилей температуры воды T и ее солености *S* в модели ВПС (красные линии) и в модели общей циркуляции океана до передачи в нее эффектов вертикального перемешивания (синие линии). На глубинах $z > z_M$ профили в обеих моделях совпадают.

5. Данные наблюдений

Никакие, даже самые совершенные модели, не могут обеспечить информацию о фактическом состоянии вод океана без наблюдений. До недавнего времени подробные прямые наблюдения, позволяющие оценить мгновенные трехмерные распределения гидрологических полей и скорости течений, имелись лишь для ограниченных акваторий и сравнительно непродолжительных интервалов времени, относящихся к проведению специальных экспедиций или экспериментов. Наиболее известные примеры — это эксперименты по исследованию синоптических вихрей в Атлантическом океане (ПОЛИГОН-70, MODE, ПОЛИМОДЕ; см. [7]), наблюдения по программе «Разрезы», выполнявшиеся в течение нескольких лет в избранных районах, так называемых энергоактивных зонах [23, 18, 14], комплексные наблюдения по программе TOGA в тропической зоне Тихого океана [69], эксперимент по циркуляции Мирового океана — WOCE [41].

В последнее время все большее распространение получают измерения течений с помощью устройств лагранжева типа — поверхностных дрейфующих буев и погруженных поплавков нейтральной плавучести [45, 51]. Пространственное положение этих устройств в последовательные моменты времени фиксируется с помощью наземных или

Book_Gidromet.indb 359 13.01.2010 13:15:14

космических навигационных систем и оперативно передается в центры сбора информации по телекоммуникационным каналам.

Прототипом современных лагранжевых средств измерения течений служит наиболее старый и простой метод, использовавшийся начиная с середины XIX века и основанный на обработке данных из вахтенных судовых журналов. Течение определяется по разнице между местоположением судна по счислению и по астрономической обсервации. Большинство выпущенных в прошлом веке атласов с картами поверхностных течений построены в значительной степени на основе именно таких данных. Примером является атлас [21].

Современное воплощение методов такого типа — реализация программы Argo, системы зондирования верхнего двухкилометрового слоя океана [35]. Международный проект Argo (The Global Array of Profiling Floats — «Глобальный массив профильных буев») осуществляется с 1999 г. под эгидой ВМО и Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО. Проектом предусмотрено создание глобальной системы регулярных измерений температуры и солености в верхнем двухкилометровом слое воды и их оперативный сбор с акватории Мирового океана. Инструментальную основу проекта составляют автономные «ныряющие» океанографические буи, общее количество которых в ноябре 2007 г. доведено до запланированных 3000 измерителей. В настоящее время число одновременно работающих буев превышает 3200 (рис. 2). География их распределения охватывает открытые районы Мирового океана и некоторые внутренние моря (такие как Средиземное, Японское).

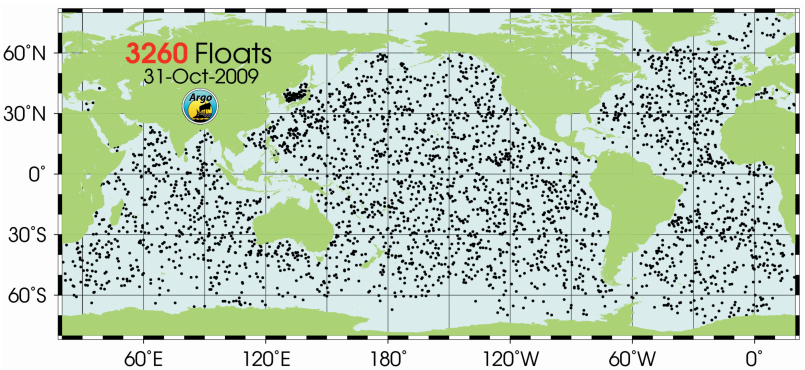


Рис. 2. Распределение буев системы Argo в Мировом океане по состоянию на 31 октября 2009 г. (по данным http://www.argo.ucsd.edu/).

Book_Gidromet.indb 360 13.01.2010 13:15:14

Реализация программы Argo существенно расширяет оперативную наблюдательную базу за состоянием вод океана. По своей значимости получение океанографических данных в таких объемах и с такой регулярностью можно сравнить лишь с созданием сети аэрологического зондирования атмосферы.

Кроме данных буев Argo, в каналы оперативного распространения информации поступают также данные измерений вертикальных распределений температуры и солености воды из других наблюдательных систем — таких, как заякоренные и (поверхностные) дрейфующие буи с подвешенными гирляндами датчиков, теряемые батитермографы (XBT), выпускаемые в основном с попутных судов, измерения CTD-зондами с экспедиционных судов (см., например, [31]). Данные буев Argo, однако, в настоящее время составляют около 80% от общего объема оперативно получаемых профильных данных в верхнем 500-метровом слое океана и почти 100% на бóльших глубинах.

Несмотря на быстрое развитие разнообразных инструментальных средств (к перечисленным выше следует добавить спутниковые измерения уровня океана, средние наклоны которого характеризуют поверхностную геострофическую циркуляцию), получаемой с их помощью информации недостаточно для построения картины крупномасштабных океанских движений в глобальной области или в отдельных океанических бассейнах для конкретных периодов времени. В связи с неполнотой прямых измерений наиболее информативные оценки состояния получаются с помощью методов усвоения данных, представляющих собой совмещение данных наблюдений с результатами расчетов по гидродинамическим моделям.

6. Зарубежные системы усвоения океанографических данных

С конца прошлого века ведущие метеорологические и океанологические центры мира активизировали работы по созданию аналогичных метеорологическим информационно-прогностических систем для океана и отдельных морских бассейнов. Основной предпосылкой послужило существенное развитие наблюдательных систем в океане. Сохраняется и развивается наметившаяся в 90-х годах тенденция к переводу наблюдательных систем в статус оперативных, когда все большее число океанских данных распространяется по международным каналам с минимальной задержкой по времени, как это давно

Book_Gidromet.indb 361 13.01.2010 13:15:16

уже практикуется для метеорологических данных в рамках Всемирной службы погоды ВМО.

На смену немногочисленным специализированным наблюдениям пришли согласованные международные проекты по регулярным измерениям, сделавшие возможным использование подходов, с успехом опробованных в метеорологии. Так, в 1997 г. была сформулирована концепция проведения международного Эксперимента по Глобальному Усвоению Океанографических Данных [50]. В ходе выполнения проекта GODAE, а также в результате осуществления национальных программ в ряде ведущих зарубежных метеорологических и/или океанографических центров созданы действующие прототипы оперативных информационно-прогностических систем.

Так, в Национальном центре прогнозов состояния окружающей среды США (National Environmental Prediction Center — NCEP) усвоение океанографических данных в оперативном режиме осуществляется с 1995 г. Усвоение данных по температуре воды (а в последней версии и солености) осуществляется на основе схемы оптимальной интерполяции с использованием эквивалентной вариационной формулировки [53, 46].

В системе ВМС США, насколько об этом можно судить по открытым источникам, представленным в публикациях сотрудников Лаборатории исследований ВМС и Океанографического офиса ВМС [48], для получения оценки текущего состояния трехмерных полей температуры и солености в океане (до глубин 1500 м) используется упрощенная процедура — так называемая «Модульная система усвоения океанографических данных» (Modular Ocean Data Assimilation System — MODAS). Она основана на трансформации климатических профилей температуры с привлечением данных лишь о поверхностной температуре и альтиметрии морской поверхности. Метод анализа — оптимальная интерполяция.

В Великобритании работа ведется в Национальном центре прогнозирования океана (National Center for Ocean Forecasting — NCOF). Этот центр функционирует в рамках стратегического партнерства между английской метеослужбой (UK Met Office) и рядом океанографических исследовательских организаций (Proudman Oceanographic Laboratory, Plymouth Marine Laboratory, National Oceanography Centre, Southampton and the Environmental Systems Science Centre at Reading). Глобальное усвоение данных и прогнозирование океанографических условий (трехмерные поля температуры воды, ее солености, скорости течений, поле толщины верхнего перемешанного слоя) осуществля-

Book_Gidromet.indb 362 13.01.2010 13:15:16

ется с использованием модели FOAM [37] с горизонтальным разрешением 1×1°. Прогноз составляется ежедневно на сроки до 5 дней с использованием 6-часовых данных об атмосферных воздействиях на поверхности океана из атмосферной модели английской метеослужбы. Система введена в оперативную практику с октября 1997 г. Доступ к полным наборам выходной продукции осуществляется на коммерческой основе.

Во французском центре Mercator реализована целая иерархия информационно-прогностических систем [36] с различным разрешением для разных районов Мирового океана. Во всех подсистемах центра Mercator в качестве усваивающей модели используется модель общей циркуляции океана OPA, а в качестве процедуры усвоения — оптимальная интерполяция. И лишь в самое последнее время реализовано усвоение на основе калмановской фильтрации — Singular Evolutive Extended Kalman (SEEK).

Кроме того, имеется еще ряд региональных систем, таких как MFS — Система прогнозирования Средиземного моря (Mediterranean Forecasting System), TOPAZ (Towards an Operational Prediction System for the North Atlantic European Coastal Zones), охватывающая Северную Атлантику, северные моря и Северный ледовитый океан [57], и др.

7. Система усвоения океанографических данных (СУОД) Гидрометцентра России

7.1. Исходные данные

В качестве усваиваемых данных используются измерения вертикальных распределений температуры и солености воды в верхнем 1500-метровом слое океана. В настоящее время бóльшая часть этих данных поставляется измерительной системой Argo (около 80% от общего объема профильных данных в верхнем 500-метровом слое океана и почти 100% на глубинах свыше 500 м). Эти данные распространяются в режиме, близком к реальному времени по каналам Глобальной системы телесвязи (ГСТ) Всемирной метеорологической организации, а также накапливаются в специализированных центрах сбора данных Argo, информационные ресурсы которых доступны через Интернет.

Предварительная обработка используемых данных включает в себя первичный контроль, формирование 10-суточных подвыборок,

Book_Gidromet.indb 363 13.01.2010 13:15:17

приведение к дискретному набору горизонтов (глубин), объединение географически близких наблюдений (т.е. формирование так называемых супернаблюдений).

В ходе предварительной обработки исключаются повторы, наблюдения с ошибочной географической привязкой (попадающие на сушу), а также данные, отклоняющиеся от сезонно зависящих средних климатических значений на величину, превышающую $\pm 3\,\sigma_T^{Cl}$ ($\pm 3\,\sigma_S^{Cl}$), где σ_T^{Cl} (σ_S^{Cl}) — зависящие только от глубины z среднеквадратичные отклонения температуры (солености), рассчитанные по данным цифрового климатического атласа WOA2001 [61, 38].

С ноября 2007 г., когда численность буев Argo, работающих в Мировом океане, достигла запланированных трех тысяч (см. http://ioc.unesco.org/iocweb/docs/Argo-3000-press-release.pdf), размер 10-суточных порций данных, получающихся после предварительной обработки, составляет около 2500 наблюдений на верхних горизонтах (до глубины около 800 м) и около 1500 на глубине 1400 м.

Для функционирования системы усвоения океанографических данных, в которой поле первого приближения получается из расчетов по МОЦО, необходимы также сведения об атмосферных воздействиях на поверхности воды на весь срок интегрирования океанской модели. Атмосферные воздействия, входящие в граничные условия МОЦО, включают сведения о потоках тепла, пресной воды и количества движения. В качестве соответствующих данных берутся либо данные глобальной прогностической системы Национальных центров прогнозирования состояния окружающей среды США (NCEP), поступающие в Гидрометцентр России по специальным каналам, либо данные, получаемые в оперативном режиме на основе выходной продукции системы среднесрочного гидродинамического прогнозирования Гидрометцентра России, в которой прогноз составляется по спектральной атмосферной модели T85L31 [26]. Те и другие данные имеют 6-часовую дискретность по времени.

7.2. Методика усвоения

Усвоение данных по температуре и солености воды производится циклически, в рамках последовательной схемы «анализ — прогноз» (рис. 3). Периодичность цикла, т.е. продолжительность интегрирования модели общей циркуляции океана (МОЦО) для получения поля первого приближения, составляет одни сутки. На шаге анализа в

Book_Gidromet.indb 364 13.01.2010 13:15:17

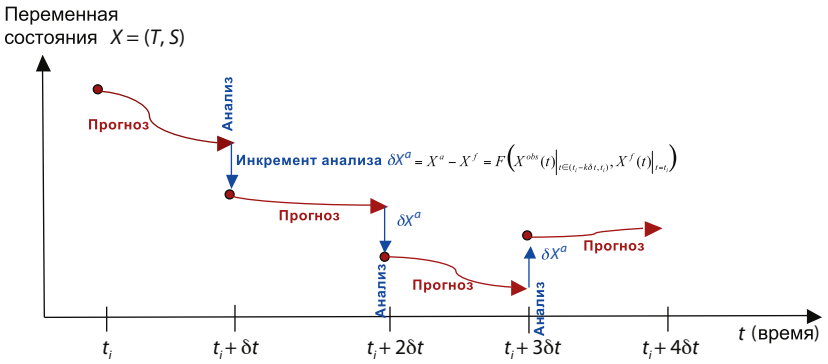


Рис. 3. Общая структура системы усвоения океанографических данных.

каждом цикле усваиваются все наблюдения по температуре и солености воды в скользящем временном окне за предыдущие 10 суток. Такая группировка данных, относящихся к разным моментам времени, производится для того, чтобы получить приемлемое покрытие наблюдениями на каждом шаге анализа. При этом, разумеется, не учитывается временная изменчивость в пределах временного окна. Подобный прием, однако, является довольно распространенным в существующих системах усвоения океанографических данных. Так, например, в СУОД, разработанной в Лаборатории геофизической гидродинамики, (Принстон, США [46]), усвоение осуществляется на каждом временном шаге (каждые 2 часа) с временным окном усваиваемых данных в 30 суток.

Для получения поля первого приближения в системе усвоения данных используется глобальная версия МОЦО, представленная в разделе 4. Расчетной областью в модели является весь Мировой океан, за исключением северной приполярной зоны к северу от 80,3° с.ш. Горизонтальное разрешение составляет 2×2° в большей части расчетной области с уменьшением шагов пропорционально косинусу широты к северу от 40° с.ш. Вертикальная структура аппроксимирована 32-мя уровнями со сгущением в поверхностных слоях.

Для усвоения данных в представляемой системе используется методика, основанная на так называемой вариационной схеме. В настоящее время реализован ее двумерный вариант (2D-Var), в котором анализ осуществляется на выбранных уровнях модели без явного учета вертикальной зависимости поля ошибок. В последующем он будет замещен трехмерным вариантом (3D-Var) с использованием

Book_Gidromet.indb 365 13.01.2010 13:15:18

более полной информации о структуре поля ошибок с учетом ее вертикальной структуры.

В соответствии с этой схемой, поле анализа ищется как минимум функционала, «штрафующего» отклонения искомого решения от наблюдений и от поля первого приближения (прогноза, получаемого по модели общей циркуляции океана) с весами, зависящими от пространственных ковариаций поля ошибок первого приближения и ошибок наблюдений.

Для определения пространственных ковариаций поля ошибок первого приближения (ошибок расчета по МОЦО) используется обобщение на пространственный случай хорошо известной в теории случайных процессов модели авторегрессии и скользящего среднего (ARMA). Пространственное обобщение — SARMA. Такая модель обладает необходимой вычислительной эффективностью и универсальностью, будучи применимой для анализа как метеорологических, так и океанографических данных. Она позволяет также учитывать зависимость статистической структуры ошибок от географического положения и от меняющихся со временем динамических полей. Предварительные результаты применения данной системы к анализу метеорологических полей опубликованы в работах [65, 66].

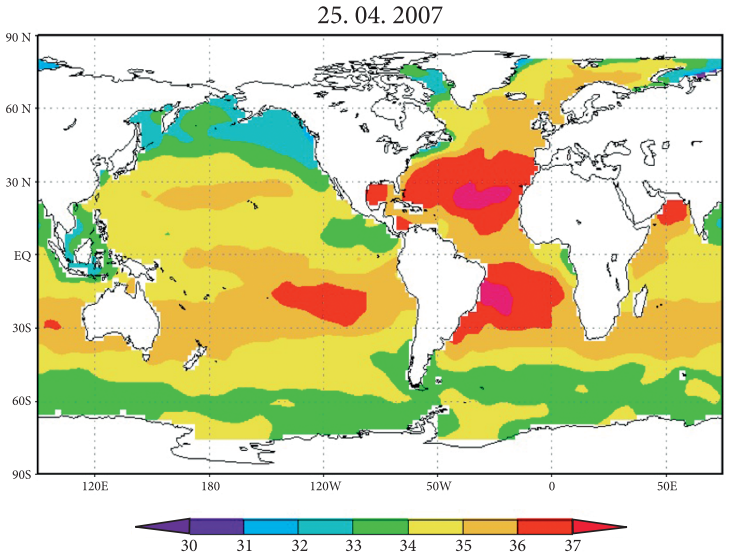
Регулярная циклическая процедура по схеме «анализ—прогноз» инициирована 1 августа 2006 г. Начальное состояние океанографических полей для этого момента времени получено путем предварительного 10-суточного интегрирования МОЦО, отправляясь от состояния покоя с климатическими июльскими распределениями температуры и солености воды из атласа WOA2001 [43]. Регулярно обновляемая (ежесуточно) продукция системы представляется в графическом виде на web-сайте (http://hmc.hydromet.ru/sea/ocean/godas/godas.html). Описание пилотной версии системы приведено в работах [5, 71].

7.3. Оценка качества СУОД

Цель любой системы усвоения данных гидрометеорологических наблюдений — это получение наилучшей возможной оценки истинного состояния по данным всех доступных наблюдений и с использованием динамической модели соответствующей геофизической среды. Однако, поскольку истинное состояние никогда не бывает известным, оценка качества продукции СУОД представляет собой непростую самостоятельную задачу. Возможные подходы к ее решению и

Book_Gidromet.indb 366 13.01.2010 13:15:18

а)



б)

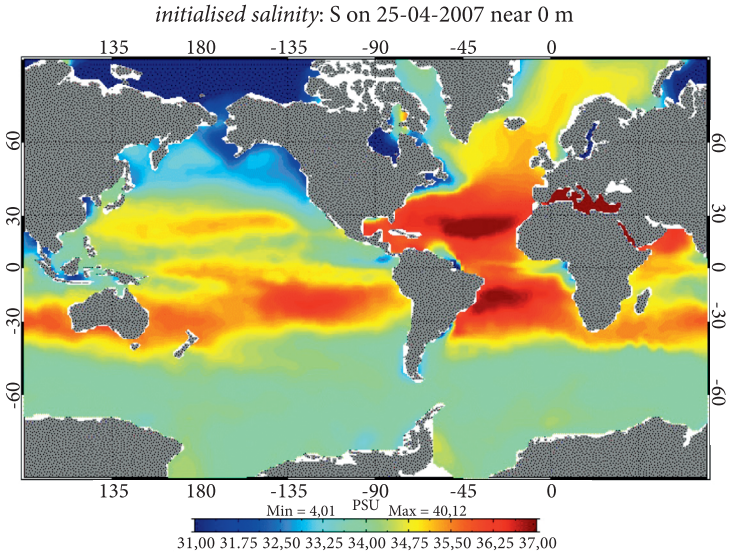
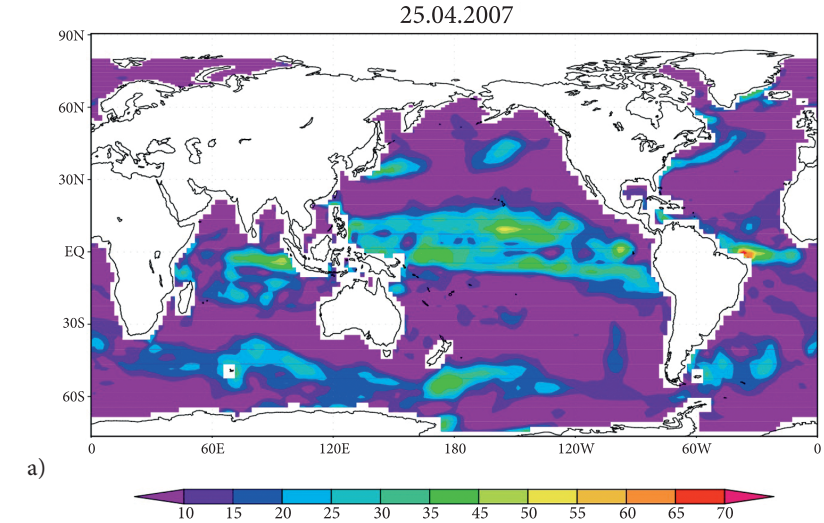
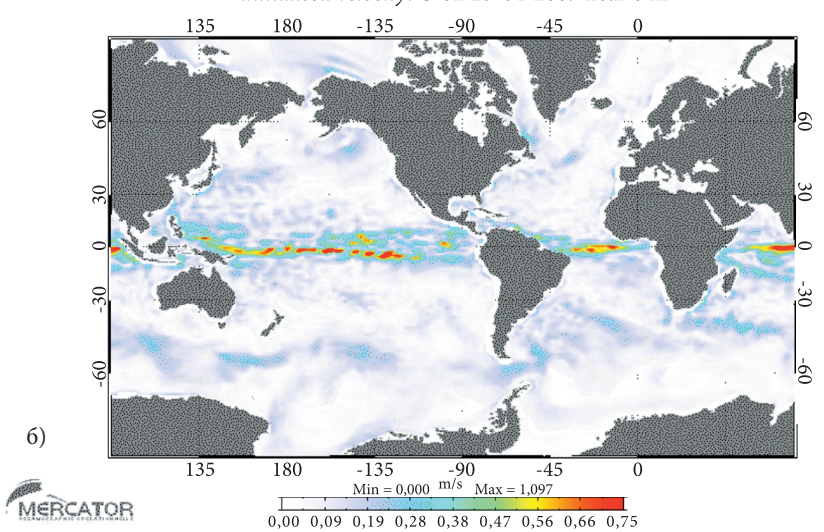


Рис. 4. Поле поверхностной солености (единицы пшс) Мирового океана за 25 апреля 2007 г. по данным систем усвоения океанографических данных Гидрометцентра России (а) и французского центра Mercator (б).



а)



б)

Рис. 5. Поле значений модуля скорости течений на поверхности Мирового океана за 25 апреля 2007 г. по данным систем усвоения океанографических данных Гидрометцентра России (а) (см/с) и французского центра Mercator (б) (м/с).

предварительные результаты оценки качества СУОД Гидрометцентра России представлены в трудах Конференции НО-2007 [5].

На рис. 4 и 5 показаны примеры выходной продукции СУОД и ее сравнение с независимыми анализами. В качестве «независимого» источника информации использована продукция системы французского центра Mercator [36] — глобальной системы PSY2G с горизонтальным разрешением модели 2×2° и 31 уровнем по вертикали, действующей в оперативном режиме с мая 2004 г.

Как видно из рис. 4 и 5, картина, даваемая двумя независимыми системами усвоения данных, довольно похожа. По крайней мере, по структуре полей на крупных масштабах. Это может служить взаимным подтверждением реалистичности оценок текущего состояния океанографических полей, получаемых в обеих системах. Другие оценки качества выходной продукции СУОД представлены в работе [5].

Продукция систем усвоения океанографических данных может использоваться для развития методов долгосрочных прогнозов погоды (на месяц и сезон), мониторинга и прогноза климатической изменчивости. Прикладные применения связаны, в первую очередь, с гидрометеорологическим обеспечением судоходства, океанического рыболовства и деятельности военно-морского флота, информационным обслуживанием органов управления и организаций, связанных с морской деятельностью. Высокое качество диагноза и прогноза океанографических полей является также залогом эффективного решения экологических задач, таких как расчет дальнего переноса примесей в океане, оценка последствий аварийных выбросов в морскую среду, проектные оценки воздействий на окружающую среду.

8. Заключительные замечания

Представленные в данной статье результаты работы системы усвоения океанографических данных свидетельствуют о том, что система обеспечивает информативные оценки текущего состояния океана на основе расчетов по модели и с использованием измерений температуры и солености воды в верхнем 1,5-километровом слое воды, получаемых в режиме близком к реальному времени.

Интенсивность главных океанических течений, однако, оказывается заниженной, а их ширина — завышенной по сравнению с наблюдениями. Не прослеживаются и синоптические вихри с характерными горизонтальными масштабами порядка 100 км. Соответствующие

Book_Gidromet.indb 369 13.01.2010 13:15:20

искажения претерпевают и связанные с течениями термохалинные поля. Основная причина этого — недостаточное пространственное разрешение, которое, как неоднократно отмечалось в литературе, имеет решающее значение для получения хорошего количественного соответствия с наблюдениями.

Но и кроме сеточного разрешения (его повышение — в значительной степени технический вопрос, решающийся по мере увеличения производительности ЭВМ) остается целый ряд проблем, которые еще предстоит разрешить. Вот лишь некоторые из них.

Структура водных масс и связанных с ними циркуляционных особенностей в некоторых частях основных океанических бассейнов формируется под воздействием водообмена с внутренними морями через сравнительно узкие проливы. Наиболее показательный пример — линза высокосоленой воды, образующаяся в восточной части Северной Атлантики в результате поступления воды из Средиземного моря через Гибралтарский пролив, ширина которого составляет всего 14,5 км. Средиземное море, в свою очередь, сообщается с еще меньшими бассейнами — Мраморным и Черным морями через еще более узкие проливы Дарданеллы и Босфор. Имеет место своеобразный каскад разномасштабных объектов, физические механизмы функционирования которого предстоит еще выяснить. Для этого потребуются совместные модели всех звеньев каскада с аккуратным описанием динамики вод в сравнительно узких проливах.

Еще одно проявление многомасштабности — взаимодействие вод открытого океана с мелководными шельфовыми областями. В моделях с грубым разрешением шельфовая зона либо сильно схематизируется, либо (по соображениям вычислительного характера, в первую очередь, в отношении решения эллиптической задачи для интегральной функции тока) вообще исключается из расчетной области. Такого рода схематизация не может не сказаться на воспроизведении процессов, ответственных за формирование склоновых вод, таких как, например, у побережья Антарктиды.

Наличие мелких особенностей геометрии бассейнов требует тонкой настройки конфигурации расчетной области. При ее формировании выполняются такие не формализуемые операции, как погружение островов и осушение заливов, не представимых должным образом на рабочих сетках, расширение либо перекрытие проливов, сглаживание рельефа дна. При этом необходимо удовлетворить подчас противоречивым требованиям. С одной стороны, обеспечить максимальную близость модельной области к реальной геометрии и,

Book_Gidromet.indb 370 13.01.2010 13:15:21

в то же время, минимизировать возможные искажения интегральных свойств, являющихся отражением реальных связей между отдельными частями океана. Сложность состоит в том, что действие локальной подстройки геометрии расчетной области может сказываться не только на локальных, но и на крупномасштабных характеристиках.

Наблюдающийся в наше время несомненный прогресс в развитии МОЦО и систем усвоения данных не оставляет сомнений в том, что большинство обозначенных выше, а также других неупомянутых здесь проблем будут в скором времени разрешены, и МОЦО, как составные части информационно-прогностических систем, станут эффективным средством удовлетворения практических запросов в отношении диагноза текущего состояния морской среды и опирающегося на него прогноза.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП «Мировой океан» (подпрограмма ЕСИМО) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-05-13569-офи_ц). Авторы выражают благодарность участникам разработки СУОД Гидрометцентра России П.П. Свиренко, Б.С. Струкову и М.Д. Цырульникову за возможность использования относящихся к ней материалов в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вунш К.* Роль циркуляции океана в формировании климата // Глобальный климат. Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 409—439.
2. *Демин Ю.Л., Ибраев Р.А.* Численная модель расчета течений и уровня в многосвязных областях океана. Препринт № 183. М.: Отдел вычислит. мат. АН СССР, 1988. 26 с.
3. *Журбас В.М., Ох И.С.* Оценки пространственных спектров скорости течений в океане по дрифтерным данным // Океанология, 2001, т. 41, № 2. С. 172—180.
4. *Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д.* Глубокая конвекция в модели общей циркуляции океана: изменчивость на суточном, сезонном и межгодовом масштабах // Океанология, 2007, т. 47, № 2. С. 211—224.
5. *Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Свиренко П.И.* Глобальная система усвоения океанографических данных: Пилотная версия // Труды VI Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» («НО-2007»), 23—25 мая 2007 г. Санкт-Петербург, 2007. С. 464—473.
6. *Зубов Н.Н., Мамаев О.И.* Динамический метод вычисления элементов морских течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 115 с.
7. Исследования синоптической изменчивости океана // Материалы советско-американского Института ПОЛИМОДЕ (Ялта, 1976). Севастополь: Изд. Морского гидрофизич. ин-та АН УССР, 1977. 500 с.
8. *Каменкович В.М.* Основы динамики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 240 с.
9. *Козлов В.Ф.* Модели топографических вихрей в океане. М.: Наука, 1983. 200 с.
10. *Коротаев Г.К., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Теория экваториальных противотечений в Мировом океане. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.

Book_Gidromet.indb 371 13.01.2010 13:15:21

11. *Кошляков М.Н., Сажина Т.Г., Гольдин А.Ю.* Тихоокеанско-Антарктическая ячейка глобального океанского конвейера // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2001, т. 27, № 4. С. 520—527.
12. *Кузин В.И.* Метод конечных элементов в моделировании океанологических процессов. Новосибирск: Вычислит. центр СО АН СССР, 1985. 190 с.
13. *Лаппо С.С.* К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // сб. «Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы». Ред. С.С. Лаппо. М.: Моск. отд. Гидрометеоиздата, 1984. С. 125—129.
14. *Лаппо С.С., Алексеев Г.В., Ефимов В.В.* Об океанологических результатах работ по программе «Разрезы» // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 1995, т. 31, № 3. С. 392—403.
15. *Линейкин П.С.* Об определении толщины бароклинного слоя в море // Докл. АН СССР, 1955, т. 101, № 3. С. 461—464.
16. *Линейкин П.С.* Основные вопросы динамической теории бароклинного слоя моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. 139 с.
17. *Линейкин П.С., Мадерич В.С.* Теория океанического термоклина. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 271 с.
18. *Марчук Г.И., Дымников В.П., Курбаткин Г.П., Саркисян А.С.* Программа «Разрезы» и мониторинг Мирового океана // Метеорология и гидрология, 1984, № 8. С. 9—17.
19. *Марчук Г.И., Саркисян А.С.* Математическое моделирование циркуляции океана. М.: Наука, 1988. 304 с.
20. *Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.Г.* Изменчивость Мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 262 с.
21. Морской атлас. Том II. Физико-географический. Под. ред. И.С. Исакова, В.В. Шулейкина, Л.А. Демина. Изд. Главного штаба военно-морских сил Мин-ва обороны СССР, 1953.
22. Открытие, экспериментальное исследование и разработка теории течения Ломоносова. Сб. под ред. А.Г. Колесникова. Севастополь, изд. МГИ АН УССР, 1968. 243 с.
23. Программа исследований взаимодействия атмосферы и океана в целях изучения короткопериодных изменений климата (программа «Разрезы») // Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос — программа «Разрезы». ВИНИТИ, 1983. Т. 1, 60 с.
24. *Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А.* Параметризация верхнего перемешанного слоя в модели общей циркуляции океана // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1991, т. 27, № 10. С. 1080—1088.
25. *Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А.* Численная реализация модели общей циркуляции океана с параметризацией верхнего перемешанного слоя // Труды Гидрометцентра СССР, 1992, вып. 323. С. 3—31.
26. *Розинкина И.А., Киктев Д.Б., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В.* Оперативный выпуск гидродинамических прогнозов погоды на средние сроки по спектральной глобальной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра РФ, 2000, вып. 334. С. 52—68.
27. *Саркисян А.С.* Основы теории и расчет океанических течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 123 с.
28. *Саркисян А.С.* Численный анализ и прогноз морских течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 182 с.
29. *Фельзенбаум А.И.* Диамика морских течений (обзор) // Итоги науки. Гидромеханика, 1968. М.: Изд. ВИНИТИ АН СССР, 1970. С. 97—338.

Book_Gidromet.indb 372 13.01.2010 13:15:21

30. *Чаликов Д.В., Реснянский Ю.Д.* Расчет планетарной циркуляции океана и атмосферы // Океанология. Т. 6 (Итоги науки и техники ВИНИТИ АН СССР). М.: изд. ВИНИТИ АН СССР, 1981. С. 4—80.
31. *Шалыгин Д.В., Реснянский Ю.Д.* Данные наблюдений, циркулирующие по каналам Глобальной системы телесвязи ВМО. Основа для анализа термохалинной структуры верхнего слоя океана в оперативном режиме // Метеорология и гидрология, 2006, №5. С. 54—68.
32. *Шапиро Н.Б.* Формирование циркуляции в квазиизопикнической модели Черного моря с учетом стохастичности напряжения ветра // Морской гидрофизич. журнал, 1998, № 6. С. 26—40.
33. *Штокман В.Б.* Уравнения поля полных потоков, возбуждаемых ветром в неоднородном море // Докл. АН СССР, 1946, т. 54, № 5. С. 407—410.
34. *Штокман В.Б.* Экваториальные противотечения в океанах. Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 156 с.
35. Argo Science Team (Dean Roemmich, Olaf Boebel, Howard Freeland, Brian King, Pierre-Yves LeTraon, Robert Molinari, W. Brechner Owens, Stephen Riser, Uwe Send, Kensuke Takeuchi, Susan Wijffels). On The Design and Implementation of Argo. A Global Array of Profiling Floats. 32 p. [available at http://www-argo.ucsd.edu/argo-design.pdf]
36. *Bahurel P.* MERCATOR ocean global to regional ocean monitoring and forecasting. Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography, E. Chassignet and J. Verron, Eds., Springer Verlag, 2005. P. 381—396.
37. *Bell M.J.*, et al. The Forecasting Ocean Assimilation Model (FOAM) system. In Building the European Capacity in Operational Oceanography // Proceedings of the Third International Conference on EuroGOOS. Elsevier, 2003.
38. *Boyer T.P., Stephens C.J., Antonov I., Conkright M.E., Locarnini R.A., O'Brien T.D., Garcia H.E.* World Ocean Atlas 2001, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 50, U.S. Government Printing Office, Wash., D.C., 2002, 165 p., CD-ROMs.
39. *Broecker W.S.* The great ocean conveyor // Oceanography, 1991, vol. 4. P. 79—89.
40. *Bryan K.* A numerical method for the study of the circulation of the world ocean // J. Comput. Phys., 1969, vol. 4, № 3. P. 347—376.
41. *Chapman P.* The WOCE Data Resource // Bulletin of the American Meteorology Society, 1998, vol. 79, № 6. P. 1037—1042.
42. *Chassignet E.P., Smith L.T., Bleck R., Bryan F.O.* A model comparison: Numerical simulations of the North and equatorial Atlantic oceanic circulation in depth and isopicnic coordinates // J. Phys. Oceanogr., 1996, vol. 26, № 9. P. 1849—1867.
43. *Conkright M.E., Locarnini R.A., Garcia H.E., O'Brien T.D., Boyer T.P., Stephens C., Antonov J.I.* World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures. CD-ROM Documentation / National Oceanographic Data Center. Silver Spring, MD, 2002. 17 p.
44. *Cox M.D.* A baroclinic numerical model of the World Ocean: preliminary results // Numerical Models of Ocean Circulation. NAS, Washington, D.C., 1975. P. 107—120.
45. *Davis R.E.* Observing the general circulation with floats // Deep-Sea Res. Part A, 1991, vol. 38, Suppl. 1. P. 531—571.
46. *Derber J., Rosati A.* A global oceanic data assimilation system // J. Phys. Oceanogr, 1989, vol. 19. P. 1333—1347.
47. *Ekman V.W.* On the influence of the Earth's rotation on ocean currents // Archiv Mat., Astron., Fys., 1905, vol. 2, № 11. P. 1—53.
48. *Fox D.N., Teague W.J., Barron C.N., Carnes V.R., Lee C.E.* The modular ocean data assimilation system (MODAS) // J. Atmosh. Ocean. Technol. 2002. Vol. 19, № 2. P. 240—252.

Book_Gidromet.indb 373 13.01.2010 13:15:22

49. *Gent P.R., McWilliams J.C.* Isopicnal mixing in ocean circulation models // J. Phys. Oceanogr., 1990, vol. 20. P. 150—155.
50. Global Ocean Data Assimilation Experiment. Strategic Plan. GODAE Report, № 6. 2001
51. *Grifa A., Owens K., Piterbarg L., and Rosovskii B.* Estamates of turbulence parameters from Lagrangian data using a stochastic particle model // J. Mar. Res., 1995, vol. 53. P. 371—401.
52. *Holland W.R., and Hirchman A.D.* A numerical calculation of the circulation of the North Atlantic Ocean // J. Phys. Oceanogr., 1983, vol. 13. P. 1093—1104.
53. *Ji M., Leetmaa A., Derber J.* An ocean analysis system for seasonal to interannual climate studies // Mon. Wea. Rev., 1995, vol. 123, № 2. P. 460—481.
54. *McDougall T.J., Jackett D.R., Wright D.G.* et al. Accurate and computationally efficient algorithms for potential temperature and density of seawater // J. of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. vol. 20. № 5. P. 730—741.
55. *Munk W.H.* On the wind-driven ocean circulation // J. Meteorol., 1950, vol. 7, № 2. P. 79—93.
56. *Oberhuber J.M.* About some numerical methods used in an ocean general circulation model with isopycnic coordinates // Advanced Physical Numerical Modelling. Proc. NATO Advanced Study Inst., 2—15 June 1985. Ed. J.J. O'Brien. NATO ASI Ser., vol. 186. Dordrecht, 1986. P. 511—522.
57. Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography, E. Chassignet and J. Verron, Eds., Springer Verlag, 2005.
58. *Pacanowski R.C., Griffies S.M.* The GFDL Modular Ocean Model (MOM). MOM 3.0 Manual. NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2000. 680 p. [Available at http://www.gfdl.gov/~smg/MOM/web/guide_parent/guide_parent.html]
59. Sandstrom J.W., Helland-Hansen B. Uber die Berechnung von Meeresstromungen // Rep. Norv. Fish. Marine Invest., 2, № 4. Bergen, 1903.
60. *Semtner A.J.* Modeling ocean circulation // Science, 1995, vol. 269, № 5229. P. 1379—1385.
61. *Stephens, C., J. I. Antonov, T. P. Boyer, M. E. Conkright, R. A. Locarnini, T. D. O'Brien, H. E. Garcia*, 2002: World Ocean Atlas 2001, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed., NOAA Atlas NESDIS 49, U.S. Government Printing Office, Wash., D.C., 176 pp., CD-ROMs.
62. *Stommel H.* The westward intensification of wind-driven ocean currents // Trans. Amer. Geophys. Union, 1948, vol. 29, № 2. P. 202—206.
63. *Sverdrup H.U.* Wind-driven currents in a baroclinic ocean with application to the equatorial currents of the Eastern Pacific // Contr. Scripps. Inst. Oceanogr., July 1947. P. 318—326.
64. Technical Guide to MOM4. GFDL Ocean Group Technical Report № 5. Authors for MOM4.0: Griffies S.M., Harrison M.J., Pacanowski R.C., Rosati A. NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. 2004, 339 p. Available online at http://www.gfdl.noaa.gov.
65. *Tsyrulnikov M.D., Svirenko P.I., Zaripov R.B.* Development of a 3-D spatial ARMA-filters based analysis scheme // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, WMO. 2006. Rep. № 34.
66. *Tsyrulnikov M.D., Svirenko P.I.* A covariance model based on 3-D spatial filters: potential for flow-dependent covariance modeling // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, WMO, 2007. Rep. № 35.
67. *Veronis G.* Large scale ocean circulation // Advances in applied mechanics, vol. 13. N.Y. London: Acad. Press, 1973. P. 1—92.
68. *Welander P.* An advective model of the ocean thermocline // Tellus, 1959, vol. 11, № 3. P. 309—318.

Book_Gidromet.indb 374 13.01.2010 13:15:22

69. WMO/TD № 717. Proceedings of the International Scientific Conference on the Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) Programme (2—7 April 1995, Melbourne, Australia) WCRP-91, WMO/TD № 717, Geneva, Dec., 1995.
70. *Wolff J.-O.* Ocean modelling efforts in the global climate system // Australian Meteorological Magazine, 1994, vol. 34, № 4. P. 263—281.
71. *Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Tsyrulnikov M.D., Strukov B.S., Svirenko P.I.* Development of a Global Ocean Data Assimilation System // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. Ed. by J. Cote. Report № 38, 2008.

Развитие технологий морских гидрологических прогнозов

З.К. Абузяров, И.О. Думанская, Е.С. Нестеров
Гидрометцентр России

Метеорологическая и океанографическая информация является важным экономическим фактором нормального функционирования судоходства, рыболовства, нефтегазодобывающих предприятий на шельфе и многих других видов морской деятельности. Все они нуждаются в морском гидрометеорологическом обеспечении (МГМО). Эту задачу выполняют прогностические органы Росгидромета, в функцию которых входит подготовка и своевременное доведение до потребителей информации о фактической и ожидаемой погоде и гидрологическом состоянии акваторий морей и океанов, а в случае угрозы возникновения опасных природных явлений (ОЯ) на морях и океанах — выпуск штормовых предупреждений и оповещений [16, 17]. Эта информация помогает потребителям оптимизировать производственные процессы и планировать наиболее удобное время и место проведения морских операций.

Организованное гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности в Гидрометцентре России началось в 1937 г. (в то время Центральный институт прогнозов) на базе созданной группы по обслуживанию народного хозяйства страны морской гидрометеорологической информацией и прогнозами, которая вскоре была преобразована в отдел морских гидрологических прогнозов (ОМГП), функционирующий по настоящее время.

Основная работа по созданию методов морских гидрологических прогнозов была сосредоточена в ОМГП, головном подразделении в области морских гидрологических прогнозов в системе Росгидромета. Подробно об истории развития отдела морских гидрологических прогнозов изложено в [2, 3, 4, 7, 12]. В данной статье основное внимание уделено технологическому развитию отдела в последние годы.

После тяжелого периода середины 1990-х годов (сокращалось бюджетное финансирование, сокращалась морская наблюдательная сеть, составляющая основу морского гидрометеорологического обеспечения морской деятельности) отделу удалось сохранить свой потенциал и в последующие годы постепенно его наращивать.

Book_Gidromet.indb 376 13.01.2010 13:15:23

До 1992 г. морское оперативное обслуживание базировалось в основном на традиционных подходах, в которых присутствовало много ручного труда. Система была достаточно жесткой и не всегда позволяла быстро реагировать на незапланированные запросы. Общая согласованность метеорологической и океанографической информации также нередко была слабой, а ее содержание не всегда учитывало специфику современной хозяйственной и другой деятельности на морях России и в Мировом океане. Существующие возможности автоматизированной обработки информации и доведения ее до конечного потребителя были ограничены. До потребителя доходила только часть информации, которая подготавливалась в Гидрометцентре России. При подготовке прогнозов использовались методы, которые в значительной степени устарели и не всегда соответствовали быстро развивающимся морским отраслям экономики.

В последние годы в прогностических подразделениях Росгидромета происходило бурное развитие компьютерных технологий диагноза и прогноза основных элементов погоды и состояния поверхности морей и океанов. Разработан и внедрен в оперативную практику комплекс новых и усовершенствованных методов автоматизированной обработки морской гидрометеорологической информации, включающий реализованные на ЭВМ современные технологии численного объективного анализа и прогноза основных гидрологических элементов режима морей и океанов.

Постоянно совершенствуется технология доставки информационной продукции до потребителя. В настоящее время информация распространяется по различным каналам связи: глобальной системе телесвязи (ГСТ) ВМО, через системы связи МЕКОМ, Интернет, мобильные средства связи, а также через подсистемы НАВТЕКС и SafetyNET в рамках глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ) и в рамках Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО).

Все это позволило существенно расширить номенклатуру, повысить точность и качество выпускаемой океанографической продукции, а также сократить время доставки этой продукции до потребителя.

Разработанные в Гидрометцентре России современные технические средства обработки данных, увеличение быстродействия и памяти доступных ЭВМ и ПЭВМ, а также создание новых компьютерных технологий диагноза и прогноза параметров морской и воздушной

Book_Gidromet.indb 377 13.01.2010 13:15:23

среды позволили создать эффективную организационную структуру морского гидрометеорологического обеспечения более высокого уровня, отвечающую современным требованиям практики.

Несомненно, что основное и наиболее значительное достижение последних лет связано с внедрением в практику ЕСИМО, разрабатываемой в рамках ФЦП «Мировой океан», и созданием на ее базе Центров ЕСИМО. Одним из таких центров является Гидрометцентр России, который активно включился в выполнение работ по созданию технологий автоматизированной обработки гидрометеорологических и других данных о морской природной среде для оперативного информационного обслуживания научной, экономической и оборонной деятельности в Мировом океане (оперативный модуль ЕСИМО) [11, 15].

Основу оперативного модуля составляют наукоемкие технологии подготовки и выпуска разнообразной диагностической и прогностической продукции глобального и регионального характера. Отдельные компоненты оперативной подсистемы ЕСИМО уже внедрены в оперативную практику научно-оперативных учреждений Росгидромета и морских УГМС.

Введен в эксплуатацию web-портал ЕСИМО (http://www.oceaninfo.ru), обеспечивающий удаленный поиск и доступ к информационным ресурсам отечественных и зарубежных источников оперативной информации, массивов и баз данных по предметной области ЕСИМО, в т.ч. прогностической продукции и данных. Оперативный модуль ЕСИМО интегрирован в технологическую линию автоматизированной оперативной обработки информации (АСООИ), функционирующую в Гидрометцентре России.

В настоящее время в технологическую линию АСООИ включены автоматизированные компьютерные технологии глобального и регионального прогноза волнения, технология прогноза штормовых нагонов на Каспийском море, технология прогноза температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя океана в Северной Атлантике, технология глобального анализа температуры поверхности воды по крупным регионам Мирового океана (северные части Атлантического и Тихого океана, тропическая зона Мирового океана) и др.

В большинстве действующих морских технологий используется анализ и/или прогноз метеорологических параметров, поэтому наряду с характеристиками, относящимися к океанографическим характеристикам, в оперативном модуле ЕСИМО присутствуют (как входная информация и как конечная продукция) оперативно об-

Book_Gidromet.indb 378 13.01.2010 13:15:23

новляемые диагнозы и прогнозы метеорологических полей. Высокая оперативность поступления входной океанографической и метеорологической информации позволяет выполнять расчеты и прогнозы в режиме, близком к реальному времени.

Информационную основу оперативной подготовки различных видов морской прогностической информации составляет ежедневный мониторинг параметров морской и воздушной среды. На основе метеорологических и океанографических данных, получаемых по различным каналам связи, в ОМГП осуществляется диагноз и прогноз элементов гидрометеорологического режима по Мировому океану и морям, окружающим территорию России. С помощью гидродинамических моделей атмосферы и океана и методов усвоения данных гидрометеорологических наблюдений 4 раза в сутки осуществляется объективный анализ полей атмосферного давления, осадков, облачности, температуры воздуха, скорости ветра, температуры поверхности океанов. Диагностические поля накапливаются в оперативной базе данных и в дальнейшем используются для составления метеорологических и океанографических прогнозов по акваториям морей, омывающих территорию России и по Мировому океану.

ГУ «Гидрометцентр России» располагает оперативной базой данных, содержащей все типы информации, необходимой для составления и выпуска прогнозов и штормовых предупреждений и оповещений об угрозе ОЯ. Использование единых, заранее согласованных методик наблюдений в стандартные сроки обеспечивает высокую степень сопоставимости полученных данных. Оперативный мониторинг морской среды одновременно служит важной основой и информационной базой для разработки моделей и методов прогнозов.

Основными «морскими» технологиями, реализованными в последние годы в Гидрометцентре России, являются:

– технология глобального объективного анализа температуры поверхности океанов (ТПО);

– технология глобального прогноза ветрового волнения;

– технология регионального прогноза ветрового волнения по акватории Северной Атлантики;

– технология прогноза штормовых нагонов в Каспийском море;

– технология глобального усвоения океанографических данных;

– технология прогноза температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя океана в Северной Атлантике;

– технология долгосрочного прогноза характеристик ледового покрова, разработанная применительно к неарктическим морям;

Book_Gidromet.indb 379 13.01.2010 13:15:24

– технология автоматизированного прогноза годового хода уровня Каспийского моря;

– технология расчета рекомендуемых курсов.

Продукция перечисленных технологий доступна в оперативной среде Гидрометцентра России и может предоставляться заинтересованным пользователям по запросу. Ниже дается краткое описание разработанных технологий.

Автоматизированное рабочее место «Море» (АРМ «Море»)

Авторы: *И.О. Жабина, И.Э. Пурина, Ю.В. Степанов, Т.С. Чекулаева, И.А. Гордиенкова*

АРМ «Море», установленное в ОМГП, снабжено программными средствами централизованной доставки на рабочие места океанологов информации с береговых станций, поступающих в коде КН-02. АРМ «Море» реализует возможности получения и визуализации сводок в коде КН-02, поступающих от ММЦ-Москва, отображения и хранения раскодируемой информации. Программные средства разработаны в среде Delphi и могут быть установлены под Windows 95 и выше.

Выбор сетевого сервера и определение частоты обращения к нему с АРМ осуществляется администратором банка данных ПРОГНОЗ. Пользователь предоставляет администратору список метеоэлементов и наблюдательных станций, которые должны быть включены в базу данных на АРМ «Море».

Технология глобального усвоения океанографических данных

Авторы: *Ю.Д. Реснянский, А.А. Зеленько*

Реализация глобальной системы усвоения океанографических данных (ГСУОД) является одной из наиболее важных задач для оперативного модуля ЕСИМО в связи с тем, что эта система представляет основу для диагноза и прогноза термохалинной структуры и динамики вод Мирового океана.

В состав ГСУОД входят следующие основные компоненты [8]:

– подсистема обработки поступающих практически в реальном времени данных оперативных морских метеорологических и океанографических наблюдений;

– модель общей циркуляции океана (МОЦО), описывающая эволюцию основных характеристик океана и, в первую очередь, изменчивость его верхних слоев;

– подсистема подготовки информации об атмосферных воздействиях на океан (поля потоков импульса, тепла и пресной воды на по-

Book_Gidromet.indb 380 13.01.2010 13:15:24

верхности Мирового океана) на базе продукции глобальных атмосферных моделей;

– блок, обеспечивающий синтез оперативных данных океанографических наблюдений и результатов расчетов по МОЦО;

– программно-вычислительный комплекс, способный перерабатывать большие объемы информации с необходимой скоростью для работы системы в режиме, близком к режиму реального времени.

Технология глобального прогноза ветрового волнения

Авторы: *И.В. Лавренов, В.И. Дымов, Т.А. Пасечник, И.Н. Давидан, Ю.В. Степанов*

Технология прогнозов волнения является совместной разработкой Гидрометцентра России и ААНИИ [5]. Оперативный выпуск прогнозов волнения в Мировом океане осуществляется в рамках АСООИ с использованием метеорологической информации, рассчитываемой по глобальной спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России. В основе технологии лежит спектрально-параметрическая модель ветрового волнения, разработанная в ААНИИ совместно с Санкт-Петербургским отделением ГОИНа.

Технология регионального прогноза волнения (на примере Северной Атлантики)

Автор: *И.М. Кабатченко*

В основе технологии лежит российская атмосферно-волновая модель (РАВМ) [5]. Модель РАВМ описывает эволюцию волн с помощью уравнения переноса энергии. В основу модели заложена гипотеза узконаправленного приближения углового спектра волн, предложенная академиком РАН В.Е. Захаровым. Гипотеза об узконаправленности углового спектра была подтверждена для простых условий волнообразования на основе детального анализа натурных измерений углового распределения энергии волн. Для сложных условий волнообразования в модели РАВМ разработан ряд приемов, которые позволяют учесть поворот ветра и изменение его скорости при прохождении над океаном активных циклонов.

Область прогноза охватывает Северную Атлантику. Разрешение модели по горизонтали 2,5x2,5°. Результаты прогноза выдаются на моменты времени: 12, 24, 36, 48, 60 и 72 ч.

В качестве исходных данных, как в первой, так и во второй прогностической модели волнения, используются поля объективного анализа приземного давления (технология А.Н. Багрова) и прогнос-

Book_Gidromet.indb 381 13.01.2010 13:15:25

тические поля давления, получаемые из спектральной модели атмосферы, функционирующей в Гидрометцентре России. Эти поля затем по специальным программам пересчитываются в поля ветра.

Технология прогноза штормовых нагонов в Каспийском море

Авторы: *О.И. Зильберштейн, О.А. Вербицкая, С.К. Попов, Г.Ф. Сафронов*

Физической основой технологии является гидродинамическая модель со свободной поверхностью, основанная на уравнениях движения в декартовой системе координат в приближении гидростатики [13]. С июня 2001 г. она включена в технологическую линию АСООИ.

Для реализации технологии организованы 2 оперативные базы данных морских параметров. Первая содержит данные наблюдений над уровнем моря, поступающие в оперативном режиме в Гидрометцентр России в коде КН-02. Вторая — прогностические поля уровня моря и течений на 19 расчетных горизонтах, прогноз ледовых условий и данные о расходе Волги (сброс из Волгоградского водохранилища в $м^3/с$), а также информацию, необходимую для расчета поля плотности, и массив глубин. Расчетная сетка содержит 126 × 216 узлов, шаг сетки 3 морские мили.

Технология автоматизированного прогноза годового хода уровня Каспийского моря

Авторы: *З.К. Абузяров, В.С. Красюк, Н.Г. Лежнева*

В основе компьютерной технологии прогноза уровня моря лежит уравнение водного баланса, включающее суммарный поверхностный и подземный притоки воды, сток воды в залив Кара-Богаз-Гол, осадки, выпадающие на поверхность моря, и испарение. Уравнение также учитывает изменения уровня моря за счет сезонных изменений плотности воды [1].

Компьютерная технология позволяет полностью автоматизировать весь процесс подготовки прогноза, включающий сбор и обработку исходной гидрометеорологической информации и выполнение расчетов, на основании которых в автоматическом режиме подготавливается официальный гидрометеорологический бюллетень ГУ «Гидрометцентр России» с результатами прогноза уровня моря.

После запуска программного комплекса «Формирование прогноза годового хода среднего уровня Каспийского моря» на экране дисплея появляется главное меню комплекса, состоящего из нескольких

Book_Gidromet.indb 382 13.01.2010 13:15:25

пунктов. Первый пункт содержит подпункты: «получение средних значений элементов», «ввод данных стока рек», «просмотр таблиц средних значений элементов», а также подпункт «выход», который выполняет завершение программы и передает управление операционной системе.

Следующий пункт главного меню программного комплекса «Прогноз уровня моря» включает в себя подпункты, связанные с формированием прогноза уровня моря и формированием таблицы с фактическими данными об уровне за год. Он включает подпункты: «ввод и корректировка данных», «формирование прогноза», «просмотр прогноза», «график уровня моря», «формирование таблицы уровня моря за прошедший год», «формирование гидрометеорологического бюллетеня».

В гидрометеорологический бюллетень включаются:

– характеристики фактического годового хода уровня моря в прошедшем году;

– прогноз среднего уровня моря по месяцам на II—IV кварталы текущего года и на январь — апрель следующего года.

Помесячный прогноз уровня составляется в конце апреля для 7 базовых пунктов: Баку и о. Жилой (Республика Азербайджан), Махачкала (Российская Федерация) Форт-Шевченко (Республика Казахстан), Гувлы-Маяк, Туркменбаши, Кара-Богаз-Гол (Туркменистан). Прогноз среднего годового уровня получается путем осреднения средних месячных значений уровня за год по данным этих пунктов.

Технология прогноза температуры и толщины верхнего квазиоднородного слоя океана в Северной Атлантике

Автор: *Е.С. Нестеров*

В основу технологии положена интегральная двухслойная модель деятельного слоя океана (ДСО), состоящая из верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и сезонного термоклина, программы привязки модели ДСО к данным объективного анализа температуры поверхности океана (ТПО) и к данным выходной продукции глобальной спектральной прогностической модели атмосферы [14]. Шаг расчетной сетки прогноза параметров ВКС равен 1,4°.

Исходными данными для анализа служат оперативные судовые наблюдения, поступающие по каналам связи и хранящиеся в базе оперативных данных Гидрометцентра России. При этом используются данные измерений ТПО, передаваемые по международным кодовым формам SHIP, BATHY, TESAC и DRIBU.

Book_Gidromet.indb 383 13.01.2010 13:15:25

Прогнозирование параметров ВКС осуществляется в три этапа:

1. Чтение из циклических баз данных прогностических полей атмосферных параметров на сроки прогноза 24, 48, 72, 96 и 120 ч и данных результатов объективного анализа ТПО.

2. Совмещение модели ДСО с оперативными данными объективного анализа ТПО и прогнозами атмосферных характеристик.

3. Интегрирование модели ДСО и выработка прогноза на 24, 48, 72, 96 и 120 ч полей толщины и температуры ВКС, отождествляемой с ТПО.

Технология автоматизированного расчета рекомендуемых курсов

Авторы: *З.К. Абузяров, Т.С. Чекулаева*

Входными полями для решения задачи выбора оптимального курса являются глобальные диагностические и прогностические поля волнения, а также поля анализа и прогноза меридиональной и зональной составляющей ветра из ежедневно пополняемых баз данных SHOT и SEL1 Гидрометцентра России [6]. Информация из баз данных ANAL и ANAZ используется для проведения послерейсового анализа проводки судна.

Рабочее место (РМ) «КУРС СУДНА», установленное в ОМГП, представлено как главное окно на рабочем столе ПЭВМ оператора-проводчика, на поверхности которого расположены панели, таблицы, функциональное меню, поля редактора.

РМ «КУРС СУДНА» позволяет осуществить автоматизированный расчет оптимального пути, а также сформировать последовательные файлы данных (на внешних носителях) для дальнейшего использования. На экран дисплея или на принтер выводится следующая информация о рейсе:

– даты выхода судна из порта отправления и прихода судна в порт назначения;

– координаты положения и курс судна на каждом расчетном шаге;

– время прохождения судном отрезка пути на каждом расчетном шаге и общее время перехода судна между портами;

– пройденное расстояние судном отрезка пути на каждом расчетном шаге и суммарное расстояние, пройденное судном от порта до порта;

– средняя скорость хода судна на каждом расчетном шаге и средняя скорость хода на всем переходе через океан;

Book_Gidromet.indb 384 13.01.2010 13:15:26

– фактические и прогностические данные о высоте волн и скорости и направлении ветра вдоль маршрута плавания;

– результаты послерейсового анализа.

Технология долгосрочного ледового прогноза по европейским неарктическим морям России

Автор: *И.О. Думанская*

Технология долгосрочного прогноза ледовых характеристик на неарктических морях европейской части России разрабатывается в Гидрометцентре России в рамках темы плана НИОКР Росгидромета «Разработать, испытать и внедрить новые модели, методы и технологии ледовых прогнозов и расчетов различной заблаговременности для арктических и замерзающих морей России» [9, 10].

Расчет по схеме долгосрочного ледового прогноза осуществляется к 5 октября.

При этом прогнозируются следующие характеристики:

1. Дата начала ледообразования (первое появление льда) в портах.
2. Максимальная за ледовый сезон ледовитость моря.
3. Максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда в районе портов.
4. Дата очищения моря ото льда в районе портов.
5. Продолжительность ледового периода в районе портов.

Информационной основой методики прогноза являются материалы электронного архива метеорологической и ледовой информации, созданного в лаборатории ледовых прогнозов ОМГП. Архив включает в себя данные по полным рядам наблюдений за температурой воздуха и приземным давлением на морских гидрометеорологических станциях (ГМС) неарктических морей, а также на станциях, расположенных в районах центров действия атмосферы (ЦДА): Сибирского максимума (Иркутск), Исландского минимума (Рейкьявик) и Азорского максимума (Понта Делиада).

Базовую часть архива составляют таблицы дат наступления ледовых фаз, продолжительности ледовых периодов и толщин припайного льда, составленные по данным наблюдений на ГМС, а также визуальные ряды ледовых ситуаций на морях (ледовые разведки, снимки ИСЗ, результаты дешифрирования снимков ИСЗ). Последние являются основой для создания таблиц ледовитости неарктических морей, которые также хранятся в электронном архиве.

Для визуализации архива создана программа «Навигатор», позволяющая быстро извлекать из него необходимую информацию в ре-

Book_Gidromet.indb 385 13.01.2010 13:15:26

жиме просмотра, осуществлять работу с выбранной информацией, обеспечивая при этом сохранность исходных файлов архива.

Разработке методики прогноза предшествовала большая работа по исследованию изменчивости характеристик ледового режима неарктических морей европейской части России во взаимосвязи с макроциркуляционными атмосферными процессами [10]. Были исследованы предполагаемые предикторы:

– среднемесячные значения давления в ЦДА и разности этих давлений на фиксированных направлениях;

– среднемесячные значения температуры воздуха, характеризующие сибирскую и североатлантическую воздушные массы и разности этих температур на фиксированных направлениях.

Были определены коэффициенты корреляции для связи сумм градусодней мороза и ледовых характеристик в портах неарктических морей с предполагаемыми предикторами [10]. Расчет осуществлялся по данным 9 месяцев, предшествующих ледовому сезону (с января по сентябрь включительно). По результатам корреляционного анализа были выбраны наиболее существенные предикторы, которые и вошли в окончательные уравнения множественной корреляции.

Технология долгосрочного ледового прогноза включает в себя три самостоятельных компоненты:

1. Расчет по уравнениям множественной регрессии на основе использования характеристик поля давления над евро-атлантическим сектором (по 29 предикторам).

2. Расчет по уравнениям множественной регрессии на основе использования характеристик поля температуры воздуха над евроатлантическим сектором (по 28 предикторам).

3. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых характеристик моря на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном результате прогноза ледовых характеристик учитывается вклад всех трех компонент. При этом величина вклада в общий результат пропорциональна обеспеченности расчета по полным рядам наблюдений в рамках каждой компоненты.

Заключение

В настоящее время актуальной задачей является разработка технологий прогноза основных морских гидрологических характеристик (температура воды, волнение, течения, уровень, ледовый покров) для

Book_Gidromet.indb 386 13.01.2010 13:15:26

всех морей, омывающих Россию. Целью технологических разработок в области морских прогнозов является комплексная автоматизированная система анализа и прогноза морских метеорологических и океанографических величин.

В основе морских прогностических технологий должны лежать научно обоснованные математические модели и методы расчета и прогноза элементов гидрологического режима морей и океанов, охватывающие различные пространственно-временные масштабы. Поэтому развитие морских гидрометеорологических прогнозов должно быть непосредственно связано с решением основных проблем океанологии и метеорологии, а именно:

– изучением пространственной и временной изменчивости гидрометеорологических элементов разных масштабов;

– выявлением связей между аномалиями процессов в океане и атмосфере;

– изучением физических механизмов обмена энергией, теплом и влагой в системе «океан — атмосфера».

Решение этих задач даст возможность усовершенствовать методы морских гидрологических прогнозов и, как следствие, повысить качество гидрометеорологического обеспечения морской деятельности.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 08-05-13524 офи-ц.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абузяров З.К.* Усовершенствованный метод прогноза годового хода уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России, 2009, вып. 343. С. 48—66.
2. *Абузяров З.К., Васильев К.П.* Морские гидрологические прогнозы // Метеорология и гидрология, 1987, № 11. С. 28—37.
3. *Абузяров З.К., Красюк В.С., Нестеров Е.С.* Развитие методов морских гидрологических прогнозов // Сборник «60 лет Центру гидрометеорологических прогнозов», Л., 1989. С. 82—99.
4. *Абузяров З.К., Нестеров Е.С.* Развитие методов и технологий морского метеорологического обслуживания // Сборник «70 лет Гидрометцентру России», СПб., 1999. С. 216—231.
5. *Абузяров З.К., Нестеров Е.С.* Сравнительная оценка успешности прогнозов волнения по отечественным волновым моделям AARI-PD2 и PABM // Труды Гидрометцентра России, 2009, вып. 343. С. 4—22.
6. *Абузяров З.К., Чекулаева Т.С.* Автоматизированный расчет рекомендуемых курсов плавания судов // Труды Гидрометцентра России, 2009, вып. 343. С. 29—47.
7. *Глаголева М.Г., Каракаш А.И., Скриптунова Л.И.* Развитие методов морских гидрологических прогнозов // Сборник «50 лет Центру гидрометеорологических прогнозов», Л., 1979. С. 152—164.

Book_Gidromet.indb 387 13.01.2010 13:15:27

8. Глобальная система усвоения океанографических данных: пилотная версия / Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А. и др. // Труды VI конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» НО-2007, СПб., 2007. С. 464—473.
9. *Думанская И.О.* Оценка возможности использования вероятностных характеристик дрейфующего льда и численной модели перераспределения льда в Белом море для гидрометеорологического обеспечения морских транспортных операций в условиях климатических изменений// Проблемы Арктики и Антарктики, СПб.: ААНИ, 2007, № 77. С. 128—142.
10. *Думанская И.О.* Проблемы разработки методик долгосрочных ледовых прогнозов в условиях современных изменений климата // Метеоспектр, 2008, №4. с. 25—30.
11. *Зеленько А.А.* Оперативный модуль ЕСИМО — система гидрометобеспечения нового поколения // Труды VI конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» НО-2007, СПб., 2007. С. 473—479.
12. *Линейкин П.С., Овсиенко С.Н. Реснянский Ю.Д.* Развитие гидродинамических методов морских прогнозов // Сборник «50 лет Центру гидрометеорологических прогнозов, Л., 1979. С. 165—177.
13. Метод краткосрочного прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря и результаты его испытаний / Зильберштейн О.И., Вербицкая О.А., Попов С.К., Лобов А.Л. // Информационный сборник № 29, 2002. С. 76—89.
14. *Нестеров Е.С., Розинкина И.А.* Оперативная система прогноза параметров верхнего слоя океана в Северной Атлантике на ЭВМ CRAY. Конференция «Информационные ресурсы об океане — актуальные проблемы формирования, распространения и использования в научных исследованиях и в морской деятельности». ОИР, 2002. Тезисы докладов, Обнинск, 2002. С. 125—126.
15. Развить методы и технологии подготовки и распространения оперативной прогностической и диагностической информации о состоянии и загрязнении морской природной среды на основе контактных и дистанционных наблюдений. Отчет о НИР по проектам ВНИГМИ-МЦД подпрограммы 10 «ЕСИМО» ФЦП «Мировой океан» (проект 2.1.1.3). Руководитель Е.С.Нестеров. 2006. 163 с.
16. Руководство по морским гидрологическим прогнозам / Под ред. З.К. Абузярова. Л.: Гидрометеоиздат, 1994. 525 с.
17. Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности. Под ред. Е.С. Нестерова. Обнинск, 2009. 143 с.

Book_Gidromet.indb 388 13.01.2010 13:15:27

Сезонные особенности термической структуры нижних слоев атмосферы в московском мегаполисе по данным микроволновых измерений температуры

И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев
Гидрометцентр России

В 90-х годах прошлого столетия в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) был разработан новый метод дистанционного измерения профилей температуры, основанный на приеме собственного теплового излучения атмосферы в диапазоне миллиметровых радиоволн [6]. С 2000 г. в московском мегаполисе проводятся круглосуточные синхронные микроволновые дистанционные измерения профилей температуры в слое 0—600 м с помощью приборов МТП-5. Сегодня измерения производятся в центре Москвы (на крыше здания Гидрометцентра России), в Тушино, МГУ, а также в ближнем Подмосковье — г. Долгопрудный и Звенигород. За рубежом подобные наблюдения проводятся во Франции, Италии, Швейцарии, Японии, США, Канаде, Корее, на Тайване, в Испании и Китае [7].

Принципиально новые наблюдения (непрерывные и с высоким разрешением по вертикали) дают возможность получать статистические характеристики термического режима городской атмосферы и изучать эффекты влияния большого города. Знание особенностей и закономерностей изменения термической структуры городского пограничного слоя определяет требования к точности прогнозирования температуры. Следовательно, расширение научных представлений о специфических физических процессах в атмосфере большого города способствует развитию методов их предсказания.

Первые результаты анализа измерений приборами МТП-5 опубликованы в работах [1, 4, 3]; последнее обобщение таких наблюдений в московском регионе сделано в работе [2].

Использованные данные

В настоящей работе приводятся результаты анализа измерений профилей температуры в нижнем 600-метровом слое приборами МТП-5 в 2004—2007 гг. в центре Москвы и в северном пригороде —

Book_Gidromet.indb 389 13.01.2010 13:15:27

территория ЦАО, находящихся на расстоянии чуть больше 20 км друг от друга. Вертикальное разрешение МТП-5 составляет 50 м; нами использовались данные на уровнях, кратных 100 м, что существенно не искажает общие закономерности.

Для срединных месяцев четырех сезонов рассчитана средняя за месяц температура воздуха на отдельных уровнях в Долгопрудном ($T(h_i)_Д$) и в центре Москвы ($T(h_i)_М$), а также разность температуры между Москвой и Долгопрудным

$$\Delta T(h_i)_{М\text{-}Д} = T(h_i)_М - T(h_i)_Д, \quad (1)$$

где $T(h_i)$ — средняя за месяц температура воздуха на i-м уровне (i = 0, 100, 200, 300).

Следует пояснить, что из-за больших погодных аномалий в январе 2004—2007 гг. (эти месяцы были в основном теплее обычного) для характеристики зимних условий выбран месяц февраль.

Для каждого часа суток рассчитаны средние за месяц вертикальные градиенты температуры в слое 0—100 м в Долгопрудном и в центре Москвы:

$$\gamma_{(0—100)} = (T(h_0) - T(h_{100}))/100. \quad (2)$$

Обсуждения

1. Сезонные особенности разности температуры между центром и пригородом

Для зимнего сезона характерно преобладание более высокой приземной температуры в центре города; разность средней месячной приземной температуры «центр — пригород» более 1°С удерживается почти 20 ч (с 16 до 11 ч утра), а максимальные различия ($\Delta T(0)_{М–Д}$ = 1,2—1,6°С) приходятся на темное время суток — с 18 до 10 ч (рис. 1а). На высоте 100 м температура в центре города близка к температуре на окраине в течение всех суток. Практически исчезает с 12 до 16 ч горизонтальная неоднородность и в слое 200—300 м, но большую часть суток слой между 200 и 300 м над центром города немного холоднее окраин, т.е. над центральной частью мегаполиса находится, условно говоря, «линза холода» (в следующем разделе это явление будет обсуждаться).

Book_Gidromet.indb 390 13.01.2010 13:15:28

В середине лета (июль) внутрисуточные изменения разности температуры «город — пригород» имеют ярко выраженные отличия от других сезонов: в течение суток весь 300-метровый нижний слой атмосферы над центром мегаполиса чаще всего теплее окрестностей; средняя месячная разность приземной температуры «центр — окраина» составляет 2°С, на высоте 100 м — 0,8°С (рис. 1б). Максимальные температурные контрасты «город — окрестность» наблюдаются с 22 до 4 ч утра. Еще одной характеристикой деформации температурного поля в мегаполисе является нагревание слоя 100—300 м при низкой высоте солнца в утренние часы. На рис. 1б этот городской эффект об-

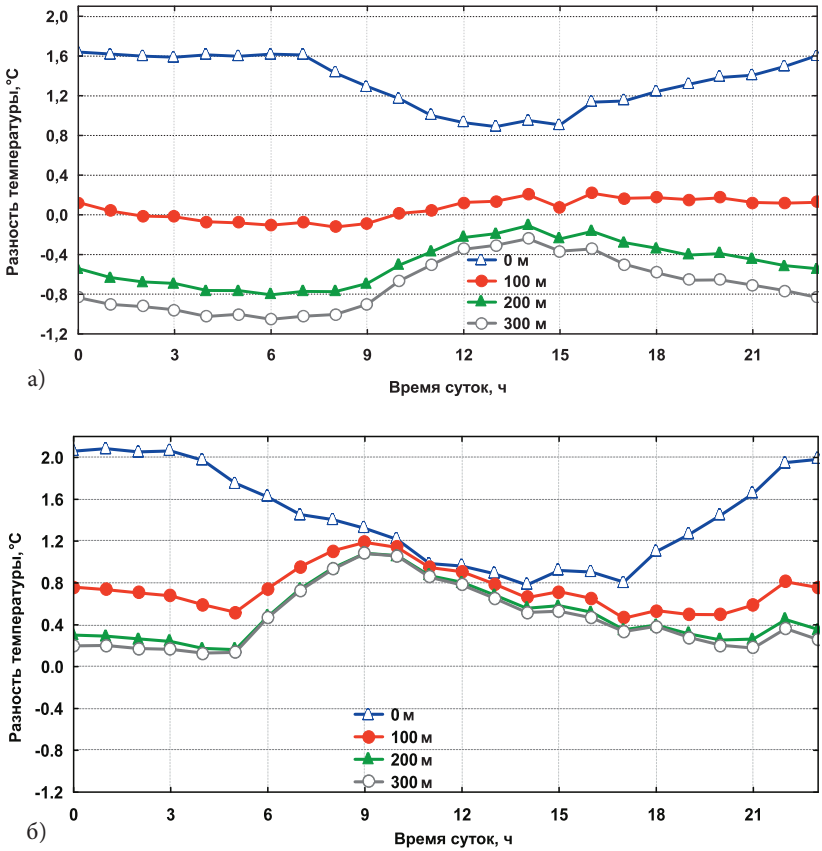


Рис. 1. Суточный ход разности температуры в слое 0—300 м ($\Delta T(h_i)_{\text{М–Д}}$) в центре Москвы и Долгопрудном (вверху — февраль, внизу — июль).

Book_Gidromet.indb 391 13.01.2010 13:15:28

наруживается в нарастании со временем величины $\Delta T(100—300)_{\text{М-Д}}$ при одновременном уменьшении $\Delta T(0)_{\text{М-Д}}$. Так, за три часа (с 6 до 9 ч) $\Delta T(0)_{\text{М-Д}}$ уменьшается на 0,4°С (с 1,7 до 1,3°С), а $\Delta T(100—300)_{\text{М-Д}}$ за это время увеличивается на 1,0°С. Следует подчеркнуть, аналогичного явления в другие сезоны не наблюдается. Очевидно, оно указывает на активное влияние аэрозолей и газовых примесей, включая водяной пар, на радиационные процессы и, соответственно, термическую структуру городского пограничного слоя. Необходимо сакцентировать внимание на том, что летом чаще, чем в другие сезоны в утренние часы наблюдаются слабые ветры и при слабоустойчивой термической стратификации в нижних слоях атмосферы происходит накопление примесей и водяного пара, сопровождающееся дымкой или мглой.

Учитывая, что термический режим нижнего слоя атмосферы характеризуется существенной внутрисуточной изменчивостью, для каждого из сезонов года проведен анализ распределения величины $\Delta T(h_i)_{\text{М-Д}}$ в ночное время (21—07 ч) и днем (09—19 ч). Оказалось, в каждый из сезонов года воздействие города на поле температуры более ярко выражено в ночные часы.

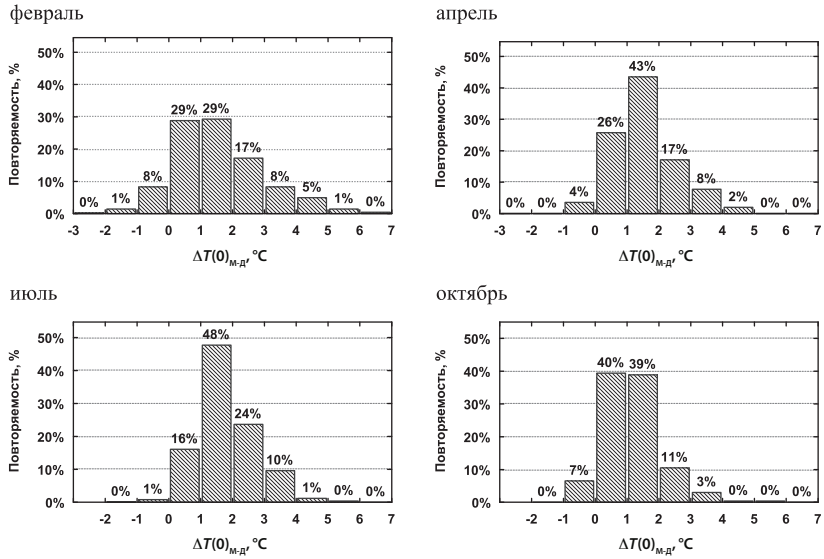


Рис. 2. Распределение $\Delta T(0)_{\text{М-Д}}$ в ночное время (21—07 ч).

Book_Gidromet.indb 392 13.01.2010 13:15:30

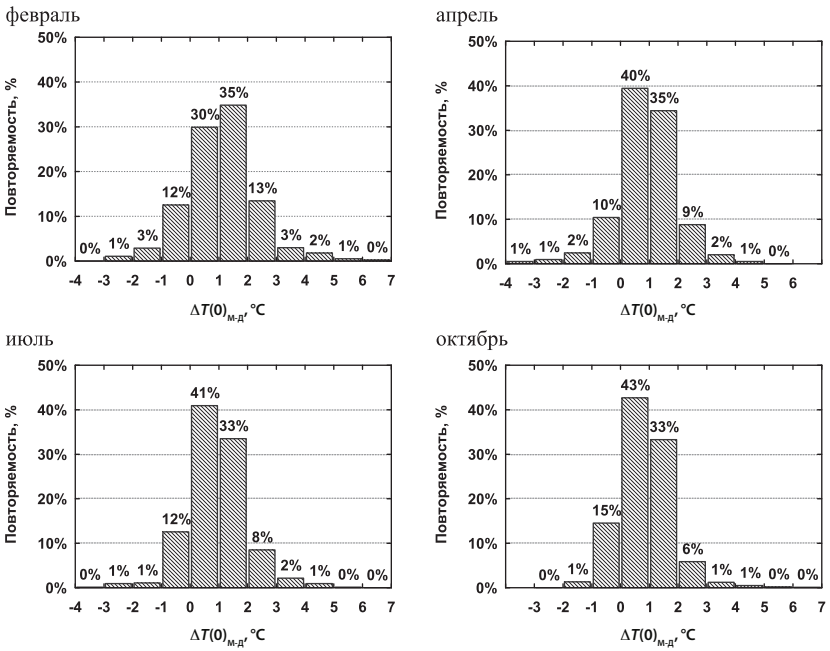


Рис. 3. Распределение $\Delta T(0)_{\text{М-Д}}$ в дневное время (9—19 ч).

В приземном слое *ночью* летом теплее практически всегда, но и в переходные сезоны в 93—95% в городе теплее, чем за городом, в феврале — с частотой около 90% (рис. 2). $\Delta T(0)_{\text{М-Д}}$ величиной >2°С, чаще (35%) наблюдается летом, осенью — реже всего (14%), в другие сезоны — около 30%. Заметим, в центре города практически никогда не бывает холоднее пригорода больше, чем на 2°С.

В дневные часы во все сезоны в центре мегаполиса воздух у земли с частотой около 85% теплее, чем в ближнем пригороде, но величина $\Delta T(0)_{\text{М-Д}} > 2$°С наблюдается редко — примерно в 10% (рис. 3). Значений $\Delta T(0)_{\text{М-Д}} < -2$°С у земли днем практически не наблюдается.

На рисунках 4—5 отражено сезонное частотное распределение разности температуры между центром и пригородом на высоте 300 м ($\Delta T(300)_{\text{М-Д}}$). *Ночью* контрасты температуры «центр — пригород» на высоте 300 м в основном меньше 2°С, а превышающие эту величину — наблюдаются только в феврале, причем в центре Москвы с повторяемостью около 15% более холоднее в пригороде (рис. 4).

Book_Gidromet.indb 393 13.01.2010 13:15:32

Городской «тепловой купол» (в центре теплее, чем в окрестностях) максимальное развитие в ночное время получает летом — в 60% случаев он простирается до высоты 300 м и выше. В другие сезоны такое явление также возможно, но не чаще чем в 41% случаев.

В *дневное время* на высоте 300 м в феврале в 60% случаев в центре холоднее, чем в пригороде («линза холода»), а в июле в 70% в центре Москвы теплее, чем в пригороде (рис. 5). В переходные сезоны — апрель и октябрь — отрицательные и положительные значения $\Delta T(300)_{\text{м-д}}$ имеют примерно одинаковую повторяемость (около 50%).

Отдельно рассмотрены случаи наибольших величин разности приземной температуры «центр Москвы — Долгопрудный» (не менее 5°С), которые могут служить характеристикой городского острова тепла (ГОТ). На рис. 6 представлено распределение величины ($\Delta T_{\text{ГОТ}}$) в теплый и холодный сезоны года. Получено, что летом городской остров тепла формируется чаще, но максимальное развитие он получает зимой. Имеются сезонные отличия: $\Delta T_{\text{ГОТ}}$ = 5°С в теплый сезон наблюдается с частотой более 60%, в холодный — почти в 2 раза реже, повторяемость $\Delta T_{\text{ГОТ}}$ = 7°С составила 10% в теплый и 17% в холодный

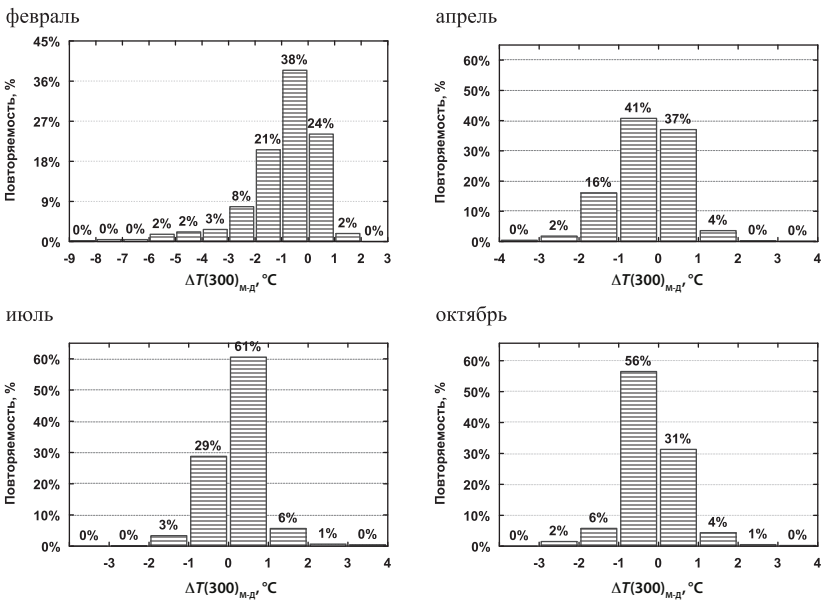


Рис. 4. Распределение $\Delta T(300)_{\text{м-д}}$ в ночное время (21—07 ч).

Book_Gidromet.indb 394 13.01.2010 13:15:33

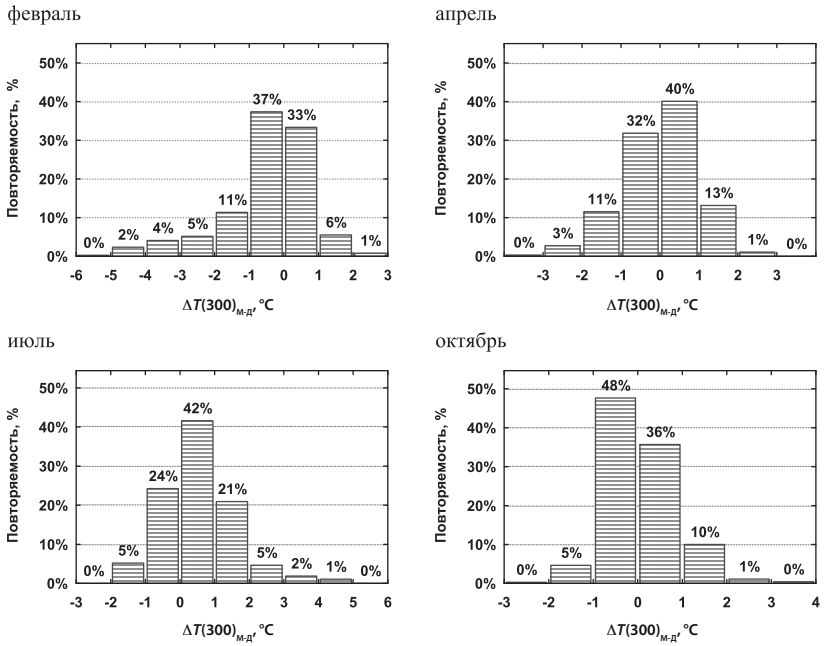


Рис. 5. Распределение $\Delta T(300)_{\text{М-Д}}$ в дневное время (09—19 ч).

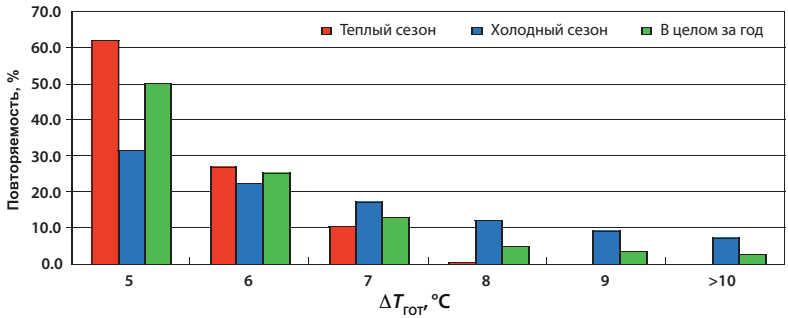


Рис. 6. Сезонное распределение величины ($\Delta T_{\text{ГОТ}}$) не менее 5°С в теплый и холодный сезоны года.

сезоны, $\Delta T_{\text{ГОТ}} = 8$°С — менее 1% и 12% соответственно. Величина $\Delta T_{\text{ГОТ}} \geq 9$°С в обсуждаемой выборке (2002—2008 гг.) летом не наблюдалась, а в холодный сезон имела место с частотой почти 15%.

Book_Gidromet.indb 395 13.01.2010 13:15:35

2. Характеристики термической устойчивости

Сезонные и внутрисуточные особенности температурных различий между центром и окраиной московского мегаполиса указывают на сильную деформацию вертикальной структуры городского пограничного слоя, дополнительной характеристикой которой служат вертикальные градиенты температуры.

Отмеченное выше специфическое явление в зимнем городском пограничном слое —«линзу холода» — удается объяснить различиями вертикальных градиентов температуры в городе и пригороде. Так, за городом ночью и в утренние часы удерживается вертикальный градиент температуры $\gamma \leq 0$°C/100 м минимум в слое 0—300 м (рис. 7). То есть, за городом в среднем за месяц наблюдается приземная инверсия

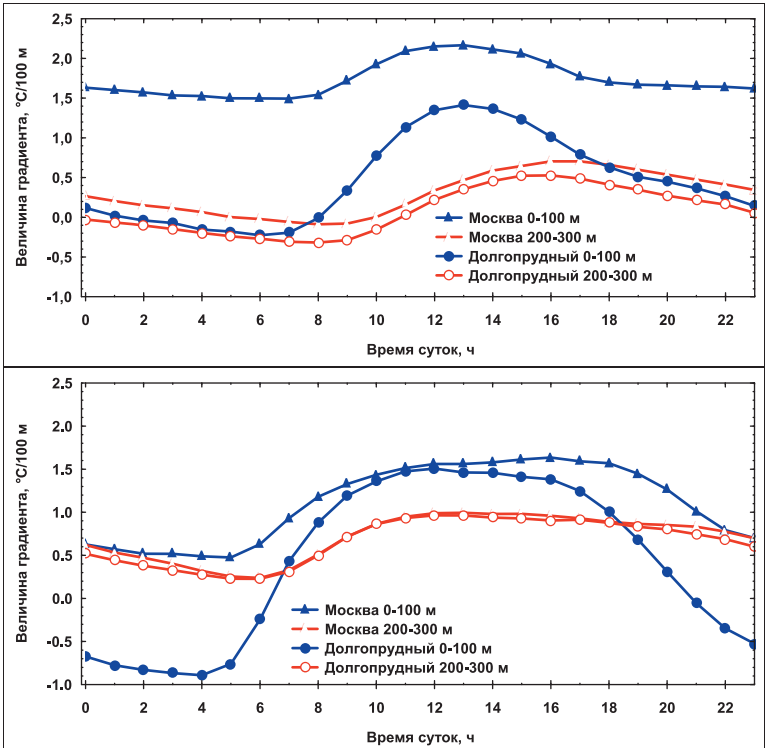


Рис. 7. Суточный ход вертикального градиента температуры γ в центре Москвы и в Долгопрудном (вверху — февраль, внизу — июль).

Book_Gidromet.indb 396 13.01.2010 13:15:37

с полуночи до 8 ч утра, полностью разрушаясь к 11 ч; вертикальный градиент температуры, превышающий γ_{ca}, наблюдается в околополуденное время и сохраняется примерно 5 ч. Столь радикальные внутрисуточные преобразования термического состояния на окраинах мегаполиса (от сильной устойчивости до сильной неустойчивости) происходят на фоне практически неизменной сверхадиабатической неустойчивости в центре города. В центре Москвы в феврале повторяемость $\gamma_{(0\text{-}100)} \geq \gamma_{ca}$ составляет примерно 95%, в Долгопрудном — в 2 раза меньше (43%). Повторяемость $\gamma_{(0\text{-}100)} \leq 0$°С/100 м в центре Москвы около 1%, в Долгопрудном — 23%.

В апреле в центре Москвы повторяемость $\gamma_{(0\text{-}100)} \geq \gamma_{ca}$ наблюдается более чем в 80% случаев, в Долгопрудном подобное состояние атмосферы наблюдается в 35% случаев. Повторяемость $\gamma_{(0\text{-}100)} \leq 0$°С/100 м в центре — около 2%, в Долгопрудном — около 22%. К числу характерных особенностей термического состояния весной в первую очередь относится формирование самых больших в году вертикальных градиентов температуры: в приземном воздухе в городе они достигают 2,2°С/100 м, в окрестностях — 1,8°С/100 м. Кроме того, большую часть суток (с 9 до 23 ч) они превышают величину сухоадиабатического градиента и в вышележащем слое. Выраженные величинами вертикальных градиентов температуры мощные конвективные потоки и запасы термической неустойчивости весной объясняются несколькими факторами: в апреле еще свободная от растительности подстилающая поверхность (альбедо маленькое) из-за сухости почвы и воздуха излучает больше тепла; меньше тепла тратится на испарение. Вероятно, играет роль и то обстоятельство, что в апреле еще продолжается отопительный сезон и сопутствующие ему прямые потери антропогенного тепла в большом городе также способствуют усилению конвективного перемешивания.

Характеристикой июля является уменьшение вертикального градиента температуры в центре мегаполиса по сравнению с апрелем (рис. 7), при том, что в середине лета солнечной радиации поступает больше. Например, в 8 ч утра средний градиент температуры в слое 0—100 м составляет в центре города в апреле 1,4°С/100 м, а в июле — 1,2°С/100 м, в Долгопрудном — 0,9°С/100 м в оба месяца. В слое 200—300 м градиент температуры в центре Москвы в июле тоже меньше, чем в апреле (в апреле 0,8°С/100 м, в июле 0,5°С/100 м). Очевидно, главной причиной ослабления термической неустойчивости в июле

Book_Gidromet.indb 397 13.01.2010 13:15:38

по сравнению с серединным месяцем весны является изменение состава нижней атмосферы, а именно увеличение содержания водяного пара и загрязняющих примесей.

Можно отметить, в июле верхняя граница слоя перемешивания с вертикальным градиентом температуры не меньше γ_{ca} поднимается до высот 200—300 м на час позже, чем в апреле. Так называемый «прорыв пограничного слоя» и быстрое рассеивание накопленных утром примесей в июле наблюдается около 10 ч. После чего происходит выравнивание величин вертикальных градиентов, следовательно, и интенсивности перемешивания, благодаря чему городской воздух значительно очищается, различия газового состава приземного воздуха в городе и пригороде становятся несущественными. Известно, что на послеполуденное время приходится главный суточный *минимум* загрязнения приземного городского воздуха. Следовательно, днем горизонтальная неоднородность в мегаполисе (в среднем 0,5—1,0°С) поддерживается исключительно за счет перегрева городской подстилающей поверхности (относительно загородной).

После 18 ч летом при нисходящем солнце вслед за охлаждением подстилающей поверхности за городом начинается быстрое уменьшение вертикального градиента: за три часа из сверхсухоадиабатического градиент преобразуется в инверсионный (рис. 7). В то же самое время центральная часть мегаполиса остается в состоянии сильной неустойчивости за счет замедленной отдачи тепла под куполом нарастающего с вечерним пиком транспортного потока загрязнения воздуха и антропогенной добавки водяного пара.

По нашим оценкам получено, что в окрестностях инверсия температуры формируется в 3 раза чаще, чем в центральной части Москвы. При сравнении характеристик термической устойчивости с удаленной на 100 км от Москвы местностью (ВММ, г. Обнинск) получено, что среднее отношение частоты образования инверсии в невозмущенной мегаполисом местности, пригороде и центре Москвы составляет 4:3:1. Это соотношение указывает, что г. Долгопрудный — ближний северный пригород — находится под влиянием теплового шлейфа Москвы. Также установлено, что при отсутствии инверсии на фоновой территории практически никогда не наблюдаются инверсии и в мегаполисе; в отсутствии инверсии в центре Москвы в 80% она не наблюдается и в Долгопрудном, в 60% — в Обнинске. Приподнятые инверсии в центре мегаполиса почти в 30% сопровождаются аналогичной инверсией в пригородах, чаще в такой ситуации на окраине мегаполиса и на фоновой территории наблюдаются приземные инверсии температуры (60—70%).

Book_Gidromet.indb 398 13.01.2010 13:15:38

Основные выводы

- Данные микроволновых измерений профилей температуры позволили получить количественные характеристики измененной под влиянием мегаполиса термической структуры в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Показано, что *зимой* антропогенное тепло в течение суток обнаруживается в основном в нижнем 100—200-метровом слое, *летом* под влиянием городского тепла в 70% случаев находится весь нижний 300-метровый слой, в центре города — наблюдается наибольшая в году внутрисуточная изменчивость термической структуры пограничного слоя атмосферы.
- Получено, что над термически неустойчивым и более теплым приземным воздухом в городе часто холоднее, чем в пригороде, образуется так называемая «линза холода». Этот городской эффект обнаруживается ночью и в ранние утренние часы в основном в холодный период, но с частотой 20—30% может проявляться в то же время суток и в летние месяцы.
- Обнаружен устойчивый, характерный только для лета эффект утреннего (6—9 ч) нагрева городского слоя на высоте 100—300 м как результат поглощения солнечной радиации городскими примесями (малые газовые составляющие и взвешенные вещества).
- Показано, в приземном слое в центре Москвы преобладают вертикальные градиенты температуры, превышающие сухоадиабатические, достигая годового максимума (2,2°С/100 м) в апреле. Повторяемость градиентов температуры ($\gamma > \gamma_{ca}$) в городе в 1,5—2 раза выше, чем в пригороде. Резко отличающиеся характеристики термической устойчивости на территории мегаполиса показывают метеорологическую обусловленность утреннего и вечернего ухудшения условий рассеивания примесей в направлении от центра города к окраинам.
- Частота образования приземных инверсий в центральной части города по отношению к ближнему пригороду (г. Долгопрудный) и невозмущенной влиянием большого города местности (г. Обнинск) находится в соотношении 1:3:4.

Подготовка материалов для юбилейного издания — повод еще раз выразить благодарность сотрудникам ЦАО, в первую очередь, Е.Н. Кадыгрову за реализацию уникального отечественного прибора МТП-5, позволившего существенно продвинуться в понимании физических процессов в пограничном слое атмосферы, а также — М.Н. Хайкину за плодотворное многолетнее сотрудничество.

Book_Gidromet.indb 399 13.01.2010 13:15:38

Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ 08-05013545-офи_ц, 08-05-00213-а, 09-05-10003-к, а также при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы» по составной части темы «МЕГАПОЛИС — интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С.* Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Докл. РАН. 2002, т. 385, № 4, С. 541—548.
2. *Кадыгров Н.Е., Крученицкий Г.М., Лыков А.Д.* Количественные оценки возмущений, вносимых мегаполисом в поле температуры атмосферного пограничного слоя // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 1. С. 1—13.
3. *Кузнецова И.Н., Артамонова А.А., Нахаев М.И.* Сравнительный анализ данных высотных наблюдений (Обнинск, Останкино) и микроволновых измерений профилей температуры // Всероссийская научная конференция «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений», Обнинск, 2008. С. 65—69.
4. *Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н.* Влияние городской среды на температуру в пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений в Москве и окрестностях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2004, т. 40, № 5. С. 678—688.
5. *Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А.* Метеорологические предпосылки формирования зимних эпизодов высокого загрязнения воздуха в г. Москва // Метеорология и гидрология, 2008, № 3. С. 48—59.
6. *Ivanov A., Kadygrov E.* The method and technique for remote measurements of boundary layer temperature profile. WMO Report N 57. Instruments and Observing Methods. WMO/TD N 588, Geneva, 1994. P. 407—412.
7. http://www.attex.ru/

Опасные паводки в бассейне р. Кубань и методы их прогнозирования

В.А. Бельчиков, С.В. Борщ, В.М. Мухин, А.Я. Полунин
Гидрометцентр России

Введение

В последние годы в Российской Федерации наметилась тенденция к увеличению числа крупных природных катастроф, связанных с наводнениями, что выдвинуло проблемы их предупреждения в число приоритетных задач, от решения которых зависит безопасность населения, экономики и страны в целом. В сложившейся ситуации значительные усилия направлены на разработку новых и совершенствование существующих методов гидрологических прогнозов и на укрепление систем наблюдений за развитием гидрологических процессов на водоемах суши.

На территории России одним из наиболее опасных, с точки зрения наводнений, регионов является Северный Кавказ, в частности бассейн реки Кубани. Периодические затопления прибрежных территорий здесь связаны с быстроразвивающимися паводками. Формирование этого типа паводков обусловлено мощной конвективной циркуляцией в предгорных и горных областях и выпадением большого количества осадков. В этом регионе дождевые и снегодождевые паводки проходят регулярно и нередко приводят к обширным затоплениям прибрежных населенных пунктов и приносят существенный материальный ущерб.

Примерно треть бассейна расположена в горах Северного Кавказа, а остальная территория — в предгорных и равнинных районах. При этом, что особенно важно, зона формирования стока расположена полностью в горной части бассейна [5]. Это приводит к быстрому стеканию воды по склонам в русла рек и резкому подъему уровней воды. Катастрофические наводнения, прошедшие в последние годы, и особенно в 2002 году на Кубани, а также отсутствие надежных методов прогнозирования подобных явлений требует разработки специальных прогностических схем, позволяющих предсказывать ситуации, при которых уровни воды в реках превысят опасные отметки.

Book_Gidromet.indb 401 13.01.2010 13:15:39

Характеристика бассейна р. Кубани

Бассейн Кубани характеризуется чрезвычайно сложной орографией, большим разнообразием климата, сложным паводочным режимом и другими важными факторами, определяющими особенности формирования стока рек (поступлением воды на поверхность бассейна, потерями на инфильтрацию и испарение и др.). Благодаря географическому положению и особенностям атмосферной циркуляции, обусловленным в основном высокими горными хребтами, их расположением и близостью речного бассейна к Черному морю климат на равнине и в предгорьях теплый. Лето жаркое, средняя температура воздуха в июле 20—22°, в горах — 16—18°. Очень характерна теплая зима со значительным числом оттепелей и с большим количеством осадков. Средняя температура воздуха на высоте 1500 м в январе минус 3—4° на западе и минус 4—5° на востоке территории бассейна. В отдельные годы на всей площади бассейна формируется довольно высокий снежный покров, который, однако, держится недолго.

Высокогорье характеризуется холодной зимой с сильными морозами и устойчивым снежным покровом. Снежный покров появляется нередко в конце октября — начале ноября и начинает таять лишь в апреле.

На большей части бассейна максимум осадков приходится на лето. В западной части бассейна наибольшее количество осадков выпадает зимой. На равнинной территории бассейна и в предгорьях годовое количество осадков составляет 550—600 мм на востоке и 900—950 мм — на западе. В горной и высокогорной частях бассейна количество осадков увеличивается до 1800—2000 мм.

Лесистость бассейна Кубани большая и на западе территории составляет 85—90%. В восточной высокогорной части, особенно в верховьях Кубани, лесистость снижается до 10—20%. До высоты 1000—1400 м леса в основном широколиственные, выше — хвойные.

Почвенный покров в бассейне Кубани разнообразен. В горах, где лесистость достигает 85—90%, повсеместно залегают бурые лесные почвы. Вдоль рек, кроме их верховьев, распространены долинные черноземы. В нижнем течении рек, где лесов мало, преобладают различные черноземы. Мощность почвенного слоя достигает 60—80 см, под лесной подстилкой залегает гумусовый горизонт. По механическому составу эти почвы относятся к суглинистым.

Book_Gidromet.indb 402 13.01.2010 13:15:39

В питании р. Кубани (это в основном верховье реки и ее притоки) значительную роль играют воды, образующиеся при таянии ледников и снега в высокогорной зоне, обуславливающие высокое летнее половодье, сток которого составляет 50—80% годового. Дождевые паводки, которые носят кратковременный характер, придают волне половодья гребенчатый вид. В верхнем течении р. Кубани значительное количество воды забирается на орошение. Водозабор осуществляется двумя каналами — Невинномысским и Большим Ставропольским.

В питании р. Лабы, которая занимает промежуточное положение между западной и восточными частями территории бассейна, наряду с талыми водами существенное участие принимает дождевая составляющая стока. Для водного режима рек западной части бассейна, где нет высоких гор, характерны дождевые паводки, при прохождении которых уровень воды может достигать опасных значений.

Даже из этой краткой характеристики бассейна Кубани следует, что условия формирования стока в бассейне весьма неоднородны. Это не позволяет получить прогностические методы в целом для всего водосбора Кубани. Решение задачи прогноза опасных паводков целесообразно осуществлять по частным бассейнам. В связи с этим для разработки методов прогноза опасных наводнений в бассейне р. Кубань были выделены следующие гидрологические районы:

1. Бассейн р. Кубань до Краснодарского водохранилища, в пределах которого было выделено 5 подрайонов:

1.1. Бассейн р. Теберда выше г. Теберда;

1.2. Бассейн р. Малый Зеленчук;

1.3. Бассейн р. Большой Зеленчук;

1.4. Бассейн р. Уруп;

1.5. Участок р. Кубань от Коста-Хетагурова до Краснодарского водохранилища.

2. Бассейн р. Лаба.

3. Бассейн р. Белая, включая р. Пшеха.

4. Юго-западные притоки р. Кубань — Пшиш, Псекупс, Афипс.

Схема речной системы Кубани с указанием гидрометрических створов [4] представлена на рис. 1, а в таблице 1 представлен перечень рек, информация по которым используется при разработке прогностических схем.

Book_Gidromet.indb 403 13.01.2010 13:15:40

Таблица 1

Список гидрометрических постов на реках бассейна Кубани

№	Река	Пункт	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Высота пункта, м
1	Кубань	свх. им. Коста Хетагурова	815	3800	812
2	Кубань	х. Дегтяревский	713	7390	338
3	Кубань	г. Невинномысск	701	11 000	309
4	Кубань	с. Успенское	629	12 800	202
5	Кубань	г. Армавир	584	16 900	159
6	Кубань	ст-ца Ладожская	354	19 800	35
7	Кубань	г. Краснодар	226	45 900	16
8	Уллукам	аул Хурзук	4,4	594	1439
9	Уч-Кулан	аул Верхний Уч-кулан	6,8	310	1509
10	Теберда	г. Теберда	46	504	1304
11	Маруха	с. Маруха	19	301	1058
12	Аксаут	с. Хасаут Греческое	28	530	1117
13	Невинка	х. Усть-Невинский	602	1,2	344
14	Большой Зеленчук	пгт. Архыз	156	513	1451
15	Большой Зеленчук	ст-ца Зеленчукская	105	802	919
16	Уруп	ст-ца Удобная	149	1370	549
17	Уруп	х. Стеблицкий	16	3190	199
18	Джелтмес	ст-ца Отрадное	1	81	421
19	Лаба	ст-ца Каладжинская	211	3370	431
20	Лаба	х. Догужиев	17	12 000	37
21	Малая Лаба	с. Бурное	37	1090	724
22	Большая Лаба	ниже Азиатского моста	52	1180	824
23	Ходзь	ст-ца Бесленеевская	48	558	468
24	Чамлык	ст-ца Вознесенская	175	554	365
25	Фарс	ст-ца Дондуковская	79	1240	134
26	Белая	п. Гузерипль	222	547	659
27	Белая	пгт. Каменномостский	180	1850	373
28	Белая	х. Кирпичный	135	2310	232
29	Дах	ст-ца Даховская	2,8	402	442
30	Курджипс	ст-ца Нижегородская	70	263	381
31	Лучка	х. Красно-Октябрьский	0,6	59	195
32	Пшеха	с. Черниговское	92	641	294
33	Пшеха	г. Апшеронск	48	1480	181
34	Пшиш	г. Хадыженск	183	710	101
35	Пшиш	аул Теучежхабль	54	1610	33
36	Псекупс	с. Садовое	125	111	166
37	Псекупс	с. Горячий Ключ	81	765	58

Book_Gidromet.indb 404 13.01.2010 13:15:40

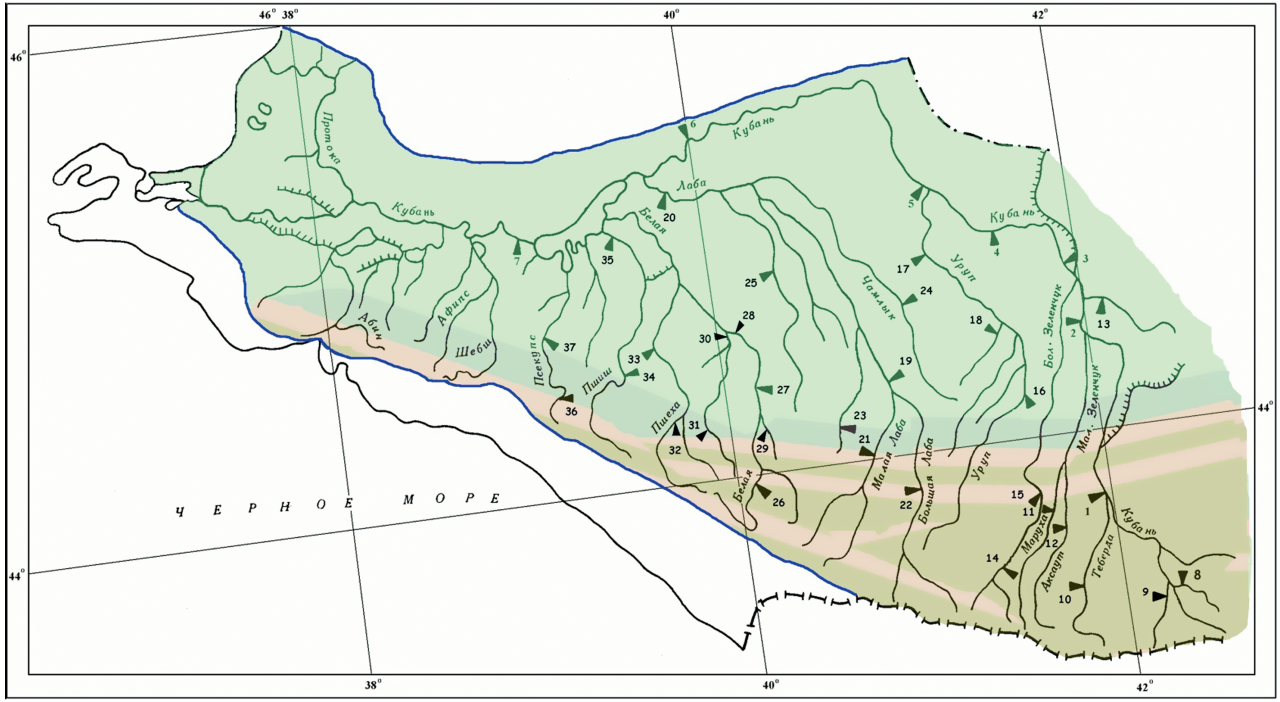


Рис. 1. Схема расположения гидрометрических постов на реках бассейна Кубани.

Book_Gidromet.indb 405
13.01.2010 13:15:41

Самые большие сложности, помимо особенностей формирования стока, были связаны с данными гидрометеорологических наблюдений:

1. Низкое пространственное разрешение — недостаточное количество метеорологических и гидрологических станций и постов, особенно в зонах формирования стока — в горных и предгорных районах;

2. Недостаточное временное разрешение — имеются лишь среднесуточные данные наблюдений за уровнями (расходами) воды;

3. Отсутствуют радарные данные наблюдений за осадками, что вместе с редкой наблюдательной сетью не позволяет провести исследование пространственно-временного распределения полей осадков и определить зоны, в пределах которых выпавшие осадки формируют наиболее катастрофические наводнения.

4. Отсутствуют реалистичные данные об отметках дна р. Кубань по продольным и поперечным профилям.

5. Возникают проблемы с получением данных о среднесуточных объемах заборов воды в каналы и сбросов в речную сеть (для оперативного функционирования разрабатываемой системы необходимо получать эти сведения ежедневно в оперативном режиме с сети станций и постов других ведомств).

6. Встречаются ошибки в уже опубликованных данных наблюдений.

7. Практически в каждом году происходит изменение морфометрических характеристик русла реки, что приводит к неустойчивости кривых расходов и необходимости их ежегодного уточнения.

Для каждого из гидрологических районов и подрайонов были выбраны свои прогностические решения. К примеру, для бассейна р. Кубань выше Краснодарского водохранилища в результате всестороннего анализа условий формирования опасных паводков, наличия данных гидрометеорологических наблюдений, их пространственно-временного разрешения, а также отечественного и зарубежного опыта прогнозирования были выбраны следующие подходы:

а) для подрайонов 1.1—1.4 — модели расчета поступления снеговой, ледниковой и дождевой составляющей стока на поверхность бассейна (для каждого подрайона) и набор физико-статистических методов прогноза ежедневных расходов воды с заблаговременностью до трех суток;

Book_Gidromet.indb 406 13.01.2010 13:15:42

б) для участка р. Кубань от Коста-Хетагурова до Краснодарского водохранилища — набор физико-статистических связей;

в) для юго-западных притоков р. Кубань (Белая, Пшеха, Пшиш, Псекупс, Афипс) — графо-аналитические способы прогноза дождевых паводков. (Установление зависимостей между паводочным стоком и факторами его обусловливающими);

г) для подрайона 1.5 — трансформационная модель перемещения волны быстроразвивающегося паводка.

Ниже остановимся на предварительных результатах выполненных исследований и разработок.

Разработка методов прогноза дождевых паводков на юго-западных притоках Кубани

В оперативной практике прогнозов дождевого стока широкое применение получили приемы эмпирического установления для каждого конкретного водосбора приближенных зависимостей объема и высоты паводка от количества осадков и некоторых показателей, характеризующих водопоглотительную способность бассейна. Построение такого рода эмпирических зависимостей дает возможность использовать информацию, которая существует в данном конкретном бассейне. Однако в этом случае теоретический анализ возможного вида зависимости и роли отдельных факторов стока играет решающую роль.

Общее аналитическое выражение зависимости между паводочным стоком и факторами его обусловливающими можно представить в виде:

$$Y = X - p_{МАКС}\,[1 - \exp\,(-X / p_{МАКС})], \qquad (1)$$

где Y — слой стока, X — количество осадков за паводок, $p_{МАКС}$ — максимально возможные потери при данном увлажнении бассейна. Для установления этой зависимости необходим достаточно длинный ряд значений слоя стока (Y) и осадков (X), вызвавших эти паводки. Затем для каждого паводка по формуле (1) с учетом полученных значений слоя стока и осадков определяют значение параметра $p_{МАКС}$. После этого устанавливают графическую связь параметра $p_{МАКС}$ с факторами, определяющими потери дождевого стока. Такими факторами могут быть: характеристика влажности почвы перед паводком, продолжительность выпадения осадков, сезон года и др. Установив зави-

Book_Gidromet.indb 407 13.01.2010 13:15:42

симость $p_{МАКС}$ от определяющих его факторов, можем вычислить сток за паводок по данным о количестве осадков, влажности почвы и т.п.

В практике прогнозов используют достаточно простую и удобную для расчета стока зависимость, связывающую непосредственно паводочный сток с количеством осадков и характеристикой влажности почвы перед паводком:

$$Y = f(X, I_W), \qquad (2)$$

где I_W — индекс предшествующего увлажнения почвы. Построение такого вида зависимостей не требует обширной информации и наиболее приемлемо для водосборов, сложенных легкопроницаемыми почвами с близким залеганием водоупора.

Рассмотренные зависимости позволяют прогнозировать гарантированную величину объема стока за паводок, соответствующую осадкам на момент составления прогноза. Используя зависимости (1) — (2), по сумме осадков к расчетному моменту времени прогнозируют ожидаемый объем стока при условии отсутствия осадков за период заблаговременности. После получения новой информации об осадках (если они не прекратились) составляют новый прогноз и т.д.

Эти зависимости могут быть также использованы для расчета гидрографа либо максимального расхода воды. Для этого на каждый расчетный интервал времени вычисляются интегральные суммы осадков, начиная от первого интервала времени со стокообразующими осадками. Затем по графикам связи между стоком и определяющими его факторами находят соответствующие им суммы стока, разности которых и дают слои стока в каждую единицу времени. Осуществив их преобразование с помощью кривой добегания или единичного паводка, получаем гидрограф, соответствующий осадкам, выпавшим к моменту выпуска прогноза. Аналогичная процедура повторяется после получения новой информации об осадках.

Данный подход был применен к юго-западным притокам Кубани — р. Белая до ст. Каменномостская, р. Пшеха до г. Апшеронск, р. Пшиш до г. Ходыженск и р. Псекупс до с. Горячий Ключ. При разработке методов прогноза использовалась только сеть информационных станций и постов. Учитывая сложную орографию и особенности климата бассейна Кубани, обусловивших прежде всего значительное изменение по площади бассейна количества осадков, вызывающих дождевые паводки, необходимо отметить, что имеющаяся сеть метеорологических станций безусловно является недостаточной для оценки количества дождевых вод, поступающих на горные водосборы.

Book_Gidromet.indb 408 13.01.2010 13:15:43

Таблица 2

Пункты метеорологических наблюдений, данные по которым использованы в работе

Наименование	Вид пункта	Принадлежность речному бассейну	Высотная отметка, км
Каменномостский	пост	Белая	0,400
Даховская	станция	Белая	0,504
Гузерипль	станция	Белая	0,683
Белореченск	станция	Белая	0,133
Майкоп	станция	Белая	0,215
Нижегородская	пост	Белая, Пшеха	0,395
Горячий Ключ	станция	Псекупс	0,060
Горный	станция	Пшиш, Псекупс	0,325
Хадыженск	пост	Пшиш	0,109
Черниговская	пост	Пшеха, Пшиш	0,301
Апшеронск	пост	Пшеха	0,193
Садовое	пост	Псекупс	0,200

Для разработки методов прогноза дождевых паводков были собраны и обобщены материалы наблюдений за осадками, температурой воздуха, уровнями и расходами воды за 12-летний период. Список привлекаемых гидрометрических постов и обобщенная характеристика частных бассейнов речной системы Кубани приведены в таблице 1, а основные сведения о пунктах метеорологических наблюдений — в таблице 2.

На данном этапе неоднородность бассейнов по условиям формирования паводочного стока рассматривалась в связи с высотной протяженностью бассейнов. Бассейн выше замыкающего створа разбивался на высотные зоны с шагом 0,2 км, в пределах которых рассчитанные значения метеорологических элементов предполагались постоянными для каждых расчетных суток. Распределение площадей по высотным зонам бассейнов приведено в таблице 3.

Для расчета осадков в условиях недостаточного количества пунктов метеорологических наблюдений, особенно в верхних областях водосборов, оказалось целесообразным использовать следующее выражение, описывающее высотное распределение суточных сумм осадков p в пределах горного водосбора [2].

Book_Gidromet.indb 409 13.01.2010 13:15:43

$$p_{z,t} = p_{0,t} \cdot (1 + k_{2,t} \cdot (z - z_0) + k_{3,t} \cdot (z - z_0)^2), \quad (3)$$

где $p_{z,t}$ — суточная сумма осадков на высоте z в t-е сутки; $k_{2,t}$ и $k_{3,t}$ — параметры вертикального распределения осадков для t-х суток календарного года; t = 1, 2, … , 365; z — высотная отметка в диапазоне высот речного бассейна; z_0 — некоторая высотная отметка в диапазоне высот речного бассейна, для которой вычисляются значения $p_{0,t}$.

Таблица 3

Распределение площадей водосборов по высотным зонам, %

Средняя высота зоны, км	р. Белая	р. Пшеха	р. Пшиш	р. Псекупс
3,1	0,03			
2,9	0,25			
2,7	0,48	0,01		
2,5	1,71	0,03		
2,3	2,53	0,13		
2,1	3,56	1,37		
1,9	5,36	1,54		
1,7	6,21	2,09	0,05	
1,5	8,49	2,43	0,31	
1,3	9,98	3,20	0,76	
1,1	11,48	4,73	1,74	0,04
0,9	13,48	5,71	3,99	2,68
0,7	15,31	7,08	8,12	12,12
0,5	21,13	10,39	18,94	39,25
0,3		15,64	36,51	28,92
0,1		45,66	29,56	16,99

Значение $p_{0,t}$ рассчитывается по значениям суточной суммы осадков на используемых пунктах метеорологических наблюдений по следующему соотношению:

$$p_{0,t} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \frac{p_{i,t}}{1 + k_{2,t} \cdot (z_i - z_0) + k_{3,t} \cdot (z_i - z_0)^2}, \quad (4)$$

Book_Gidromet.indb 410 13.01.2010 13:15:43

где n_p — количество пунктов наблюдения за осадками в пределах водосбора, z_i — высотные отметки этих пунктов, $p_{i,t}$ — суммарные осадки за t-е сутки на i-м пункте наблюдений.

Описание вертикального распределения осадков в горном водосборе при помощи многочлена второго порядка соответствует установленной на обширном фактическом материале приблизительно линейной зависимости вертикальных градиентов интенсивности выпадения осадков в горах от высоты и, в связи с этим, широко применяется в гидрологической практике. Однако в процессе проведения работ выяснилось, что имеющееся количество метеостанций является недостаточным для надежного определения параметров распределения осадков по высоте. К коэффициенту k_3 при квадратичном члене $(z_i - z_0)^2$, это относится в большей степени, поскольку имеющиеся станции в основном расположены в нижних частях рассматриваемых бассейнов и данными наблюдений освещена меньшая часть их высотных диапазонов. Чтобы избежать необходимости экстраполировать аппроксимирующие многочлены второго порядка на верхнюю часть диапазона высотных отметок бассейна, мы посчитали нецелесообразным учитывать нелинейность высотного распределения осадков, т.е. было принято $k_3 = 0$ для всех месяцев года.

Значения параметров k_2, определенные по данным о нормах месячных сумм осадков на метеостанциях и постах для каждого из рассматриваемых водосборов притоков р. Кубань, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Коэффициенты k_2 высотного распределения осадков (в м$^{-1}$)

Река	Номер месяца											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Белая	0,53	0,75	0,94	0,83	0,50	0,38	0,88	0,79	0,70	0,55	0,55	0,55
Пшеха	0,50	0,57	0,38	0,20	0,44	0,27	0,70	0,43	0,57	0,28	0,22	0,22
Пшиш	1,35	1,50	2,21	1,72	1,09	1,17	1,72	1,52	1,85	1,35	1,35	0,94
Псекупс	1,20	1,20	1,01	1,59	1,20	1,47	2,05	1,47	2,13	1,20	0,81	1,41

По этим данным значения суточных сумм жидких осадков рассчитываются для всех высотных зон горного бассейна.

Данные об осадках используются и для определения суммарного количества осадков, формирующих сток паводка и для расчета индекса увлажненности бассейна.

Book_Gidromet.indb 411 13.01.2010 13:15:44

Расчет значений температуры воздуха, которые необходимы для расчета показателя увлажнения, производится подобным образом, но зависимость среднесуточной температуры от высоты принимается также линейной:

$$\theta_{z,t} = \theta_{0,t} - \gamma_t \cdot (z - z_0), \tag{5}$$

где $\theta_{z,t}$ — среднесуточная температура воздуха на высоте z, в t-е сутки; γ_t – вертикальный градиент температуры в t-е сутки календарного года; $t = 1, 2, \ldots, 365$; z — высотная отметка в диапазоне высот речного бассейна; z_0 — некоторая высотная отметка в диапазоне высот речного бассейна, для которой вычисляются значения $\theta_{0,t}$.

Значение $\theta_{0,t}$ вычисляется по данным метеостанций о среднесуточной температуре воздуха за t-е сутки расчетного года.

$$\theta_{0,t} = \frac{1}{n_\theta}\sum_{i=1}^{n_\theta}\theta_{i,t} + \gamma_t \cdot \left(\frac{1}{n_\theta}\sum_{i=1}^{n_\theta} z_i - z_0\right), \tag{6}$$

где z_i — высотная отметка i-го пункта наблюдений за температурой, $\theta_{i,t}$ — средняя суточная температура воздуха на этом пункте.

Полученные по данным о норме среднемесячной температуры воздуха на метеостанциях (по метеопостам данные по температуре воздуха отсутствуют) значения вертикального градиента температуры (одинаковые для всех четырех рассматриваемых юго-западных притоков Кубани) приведены в таблице 5.

Таблица 5

Вертикальные градиенты γ температуры воздуха в юго-западной части бассейна Кубани (°С/км)

№ месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
γ	2,3	2,7	3,8	4,8	5,2	5,5	5,4	5,1	4,3	3,5	3,0	2,6

Таким образом, для каждой из высотных зон рассчитываются ежедневные значения температуры воздуха и суточной суммы атмосферных осадков. По этим данным на каждый день теплого периода года для каждой высотной зоны горного водосбора значения индекса увлажнения рассчитывались по следующему выражению [1]:

$$I_{i,t} = \sum_{k=1}^{T} p_{z_i,t-k} \cdot \alpha(k, \theta_{D,z_i,t-k}), \tag{7}$$

Book_Gidromet.indb 412 13.01.2010 13:15:44

где $\theta_{D,z_i,t-k}$ — значение температуры воздуха в *i*-й зоне, осредненное за десятидневку, заканчивающуюся *(t–k)*-е сутки; α — весовой коэффициент; $p_{z_i,t-k}$ — суммарные осадки за *(t–k)*-е сутки в в *i*-й высотной зоне; *T* — принятый расчетный период в сутках, который отсчитывается в обратную сторону от момента, на который рассчитывается индекс.

Весовые коэффициенты зависят от температуры воздуха и расчетного периода. На основании проведенных численных экспериментов расчетный период *T* был принят равным 10 суткам. В таблице 6 приведены значения коэффициентов α_i в зависимости от температуры воздуха и расчетного интервала времени при выборе осадков.

Таблица 6

Значения весового коэффициента α для расчета индексов увлажнения бассейна притоков р. Кубани

Расчетный период суммирования осадков, сут.	Температура воздуха, °С				
	0	5	10	15	20
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,00	1,00	0,92	0,83	0,82
2	0,90	0,82	0,74	0,62	0,58
3	0,80	0,68	0,62	0,48	0,43
4	0,70	0,54	0,50	0,38	0,31
5	0,58	0,41	0,38	0,29	0,19
6	0,46	0,31	0,28	0,20	0,09
7—8	0,32	0,21	0,18	0,12	0,05
9—10	0,17	0,11	0,08	0,05	0,00

Значение индекса увлажнения для всего водосбора рассчитаны как среднее взвешенное значений, относящихся к высотным зонам:

$$I_t = \sum_{i=1}^{n_s} I_{i,t} \cdot w_i \Big/ \sum_{i=1}^{n_s} w_i, \qquad (8)$$

где I_t и $I_{t,i}$ — показатели увлажнения водосбора и его *i*-й высотной зоны; w_i — весовые коэффициенты; n_s — количество высотных зон.

Рассматривались два варианта задания коэффициентов взвешивания *w*, в качестве которых принимались: 1) площади высотных зон; 2) значения произведений этих площадей на значения $1+k_{2,t}\cdot(z-z_0)$.

Book_Gidromet.indb 413 13.01.2010 13:15:45

Ниже приводятся полученные прогностические уравнения и оценки их эффективности. В качестве входных данных использовались значения суммарных осадков за период формирования паводка и индекс увлажнения бассейна, рассчитанный на дату, предшествующую началу паводка. Для прогнозирования слоя стока и максимальных расходов за паводок использовали уравнения линейного вида. Параметры определялись методом наименьших квадратов.

Оценка эффективности метода прогноза и его точности производилась по принятому отношению S/σ , где S — среднеквадратичная ошибка прогноза; σ — среднеквадратическая изменчивость прогнозируемого явления.

Другим параметром оценки метода прогноза является расчет количества оправдавшихся прогнозов *P%*. Оправдавшимся прогнозом является прогноз, ошибка которого не превышает 0,674σ. Обеспеченность рассчитывается как соотношение количества оправдавшихся прогнозов к их общему числу.

Уравнения для прогнозов слоя стока и максимального расхода *р. Белая — п. Каменномостский:*

$$Y = 0{,}19 \times X + 0{,}28 \times J - 9{,}8 \qquad (9)$$

$$Q = 2{,}0 \times X + 1{,}46 \times J - 47{,}1. \qquad (10)$$

Эффективность этих уравнений оценивается величиной S/σ равной 0,40 и значением обеспеченности 93%.

Для *р. Пшеха — г. Апшеронск* получены следующие уравнения:

$$Y = 0{,}03 \times X + 0{,}49 \times J - 14{,}0 \qquad (11)$$

$$Q = 1{,}19 \times X + 2{,}12 \times J - 50{,}3. \qquad (12)$$

Оценка эффективности первого из этих уравнений $S/\sigma = 0{,}64$ и обеспеченность 80%. Для второго уравнения $S/\sigma = 0{,}60$, а обеспеченность 76%.

Для *р. Псекупс — п. Горячий Ключ* получены следующие прогностические уравнения:

$$Y = 0{,}28 \times X + 0{,}21 \times J - 9{,}6 \qquad (13)$$

$$Q = 1{,}13 \times X + 0{,}63 \times J - 15{,}0. \qquad (14)$$

Оценка эффективности прогностического уравнения для слоя стока: $S/\sigma = 0{,}59$, обеспеченность оправдавшихся прогнозов составляет 78%. Для второго уравнения $S/\sigma = 0{,}67$, обеспеченность составляет 76%.

Book_Gidromet.indb 414 13.01.2010 13:15:45

Для *р. Пшиш — п. Хадыженск* получена зависимость приращения расходов воды (ΔQ) за первые сутки паводка от суммарного слоя осадков, выпавших в день паводка:

$$\Delta Q = 2{,}2X - 26{,}6. \qquad (15)$$

Оценка эффективности прогностического уравнения $S/\sigma = 0{,}51$.

Точность разработанных зависимостей для рассматриваемых рек вполне приемлемая, и их можно использовать при прогнозировании опасных паводков в бассейне р. Кубань. Заблаговременность прогноза, конечно, не очень значительна. Это объясняется малым временем добегания дождевой воды до замыкающего створа. Для увеличения заблаговременности необходимо привлекать данные краткосрочных прогнозов осадков.

Разработка методов прогноза дождевых паводков в бассейне р. Кубань выше Краснодарского водохранилища

Для разработки методов прогноза опасных паводков для рек восточной части бассейна Кубани (верхнее течение Кубани и ее притоки), где большую роль играет талая составляющая стока, разработана *модель формирования снежного покрова и расчета поступления талодождевого стока на поверхность горного водосбора*.

В модели используются рассчитанные значения осадков по высотным зонам. Характерной особенностью бассейна р. Кубань является неустойчивость формирования снежного покрова, отмечаемая на большей части площади водосбора, поэтому схема расчета снежного покрова работает при условии произвольного чередования периодов убыли и нарастания запаса воды в снеге.

Для повышения устойчивости расчетной схемы принято допущение о существовании некоторого, характерного для данного бассейна, распределения снегозапасов по его площади. Алгоритм расчета динамики снежного покрова разработан в предположении, что независимо от распределения снегозапаса в какой-то момент времени, дальнейшее выпадение снега приводит к формированию снежного покрова с характерным распределением. В качестве характерного распределения используется типовое распределение максимальных снегозапасов.

Расчеты динамики снежного покрова проводятся отдельно для лесной и открытой частей каждой из высотных зон.

Как установлено различными исследованиями, эмпирические распределения максимального запаса воды в ненарушенном сне-

Book_Gidromet.indb 415 13.01.2010 13:15:46

готаянием снежном покрове, соответствующие определенным типам ландшафта, являются в определенной степени устойчивыми. На практике для их аппроксимации применяется гамма-распределение. Нами с этой целью используется усеченное экспоненциальное распределение [3], позволяющее получить более наглядные расчетные формулы:

$$G(H)=\left\{\begin{array}{ll} 0 & \text{при } H<R \\ 1-\exp\left[-(H-R)/P\right] & \text{при } R\le H<P\cdot\ln M+R \\ 1 & \text{при } H\ge P\cdot\ln M+R \end{array}\right\}, \quad (16)$$

здесь P, R и M — параметры распределения. Их значения для данной зоны можно определить исходя из значений снегозапаса, коэффициента вариации и наибольшего модульного коэффициента эмпирического распределения максимальных снегозапасов.

При снеготаянии и повторном выпадении снега на частично стаявший снежный покров для описания распределения снегозапасов используется выражение более общего вида:

$$F(H)=\left\{\begin{array}{ll} 0 & \text{при } H<R \\ 1-\exp\left[-(H-Q)/P\right] & \text{при } R\le H<P\cdot\ln M+Q \\ 1 & \text{при } H\ge P\cdot\ln M+Q \end{array}\right\}, \quad (17)$$

G-распределение является частным случаем F-распределения при $Q = R$.

Расчет трансформации имеющегося в данный момент распределения снега $F_0(H)$ осуществляется по следующей схеме. При стаивании h мм снега, его новое распределение имеет вид $F_0(H+h)$. Если $h \ge P\cdot\ln M+Q$, то высотная зона предполагается полностью освободившейся от снега. Также принято, что в процессе выпадения снега на уже имеющийся снежный покров, имеющий F-распределение, оно определенным образом изменяется, приближаясь по форме к G-распределению. При выпадении D мм снега G-распределение восстанавливается. Если $F_0(H)$ совпадает с $G(H)$ или первоначально снег отсутствует, то $D = 0$. В общем случае значение D рассчитывается с учетом различия скоростей повышения среднего и максимального для данной зоны снегозапаса при выпадении снега.

Book_Gidromet.indb 416 13.01.2010 13:15:46

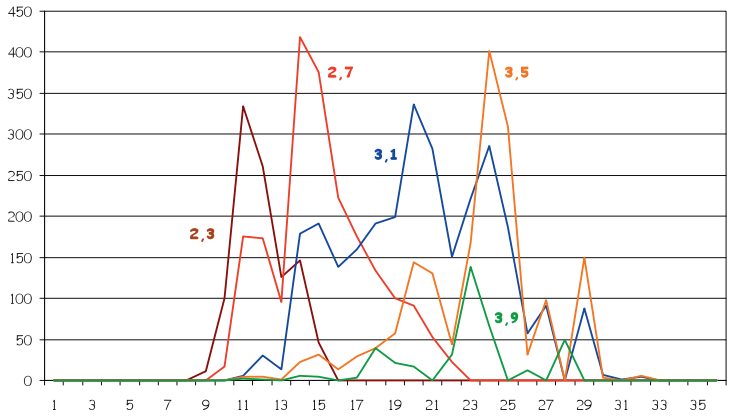


Рис. 2. График рассчитанных среднедекадных значений поступления талой воды на полевую часть высотных зон бассейна р. Кубань выше г. Армавир. Числа у линий — высотные отметки средней линии высотных зон, по оси абсцисс — номера декад в календарном году.

В модели учитывается водоудерживающая способность снега, принимаемая постоянной для всего периода снеготаяния. Значения коэффициента стаивания задавались отдельно для лесной и открытой частей высотных зон.

Расчеты по предложенной схеме выполнены для бассейна р. Кубань выше г. Армавир. На рисунках 2 и 3 приведены графики хода талого поступления в 1982 г., рассчитанного по предлагаемой схеме для лесных и полевых частей высотных зон имеющих средние высотные отметки равные 2,3, 2,7, 3,1, 3,5 и 3,9 км. Модель работает с шагом по времени равным одним суткам. Представленные на графике среднедекадные значения поступления талых вод получены осреднением ежедневных значений.

Графики показывают, что рассчитанные значения поступления воспроизводят основную особенность процесса снеготаяния в горных водосборах: более поздние сроки таяния в более высоких зонах бассейна (в нашем случае в зонах с отметками 3,1, 3,5 и 3,9 км по сравнению с зонами 2,3 и 2,7 км). Понижение температуры воздуха с высотой сказывается на снижении общего объема талых вод в зоне 3,9 км. В общем, наличие существенных различий в ходе снеготаяния в разных высотных зонах показывает предпочтительность расчета поступления воды на высотные зоны по сравнению с расчетами для водосбора в целом.

Book_Gidromet.indb 417 13.01.2010 13:15:47

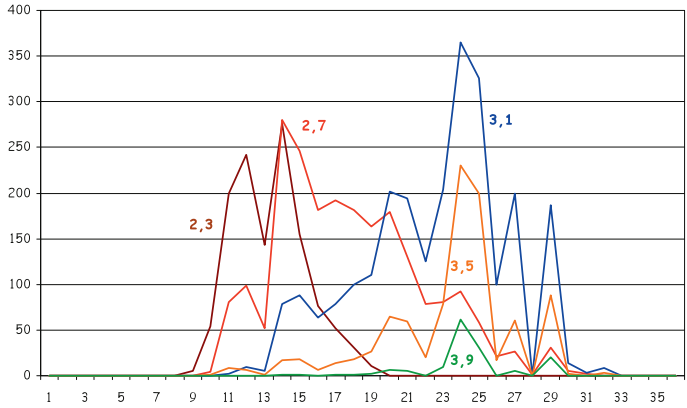


Рис. 3. График рассчитанных среднедекадных значений поступления талой воды на лесную часть высотных зон бассейна р. Кубань выше г. Армавир. Числа у линий — высотные отметки средней линии высотных зон, по оси абсцисс — номера декад в календарном году.

Результаты применения модели расчета поступления воды на поверхность бассейна являются одними из входных данных для прогноза гидрографа стока рек Теберда, Большой и Малый Зеленчуки и Уруп. Для входных высокогорных створов этих рек разработан метод прогноза ежедневных расходов воды с заблаговременностью 1—3 суток на основе модели типа «поступление — сток».

В качестве примера рассмотрим некоторые предварительные результаты для р. Теберда — высокогорный бассейн с большой долей тало-дождевой составляющей и частыми снегодождевыми паводками. Получены два вида прогностических решений, основанных на использовании различных подходов к прогнозированию и разного набора входных данных.

В первом варианте в качестве возможных предикторов были использованы непосредственные данные гидрометеорологических наблюдений — среднесуточные расходы воды, суточные суммы осадков, среднесуточная температура воздуха. Метеорологическая информация выбиралась по метеостанциям Теберда и Клухорский Перевал, а расходы воды — по гидропосту Теберда за период с 1978 по 1992 гг. с мая по ноябрь.

В результате выполненных исследований на основе методов пошаговой регрессии были получены уравнения для прогноза ежедневных расходов воды. В качестве примера приведем уравнения для р. Тебер-

Book_Gidromet.indb 418 13.01.2010 13:15:48

да у г. Теберда для прогноза ежедневных расходов воды в период с мая по октябрь. В случае использования только метеорологической и гидрологической информации (без модели поступления воды) уравнение имеет следующий вид:

$$Q_{t+1} = 0{,}876Q_{t-1} + 0{,}498X_{kpt} - 0{,}195X_{kp3} + 0{,}705T_{teb-t} + \\ + 0{,}587X_{tebt} - 0{,}142\Delta Q_t - 4{,}14, \quad (18)$$

где Q_{t+1} — расход воды на следующие после даты выпуска прогноза сутки, Q_{t-1} — расход воды за сутки до даты выпуска прогноза, X_{kpt+1} — сумма осадков по метеостанции Клухорский Перевал за сутки после момента выпуска прогноза, X_{kp3} — сумма осадков по метеостанции Клухорский Перевал за 3 суток до даты выпуска прогнозов, T_{teb-t} — среднесуточная температура воздуха по метеостанции Теберда за сутки до даты выпуска прогноза, X_{tebt+1} — сумма осадков по метеостанции Теберда на ближайшие сутки, ΔQ_t — изменение расхода воды р. Теберда — Теберда за предшествующие дате выпуска прогноза сутки.

Успешность метода, к примеру, для р. Теберда до г. Теберда составляет 92% для заблаговременности 1 сутки. Из 2576 проверочных прогнозов, составленных на зависимом материале (1978—1991), неудачными оказались 193.

Другой вариант прогностических уравнений получен для варианта использования в качестве входных данных количества талой и дождевой воды, рассчитанное по модели поступления (для р. Теберда у г. Теберда):

$$Q_{t+1} = 0{,}944Q_{t-1} + 0{,}158P_{t+1} - 0{,}188\Delta Q_t - 0{,}165, \quad (19)$$

где P_{t+1} — поступление воды на поверхность бассейна, рассчитанное по модели на период заблаговременности прогноза.

Успешность метода, к примеру, для р. Теберда до г. Теберда составляет 95% для заблаговременности 1 сутки. Из 2576 проверочных прогнозов, составленных на зависимом материале (1978—1991) неудачными оказались 120.

Дальнейшее улучшение разработанного метода может быть достигнуто на основе раздельного прогноза ледниковой и снего-дождевой составляющих стока.

В июне 2009 года в период прохождения высоких снего-дождевых паводков на притоке Кубани р. Теберда были составлены опытные прогнозы (рис. 4), которые подтвердили правильность выбранных решений.

Book_Gidromet.indb 419 13.01.2010 13:15:48

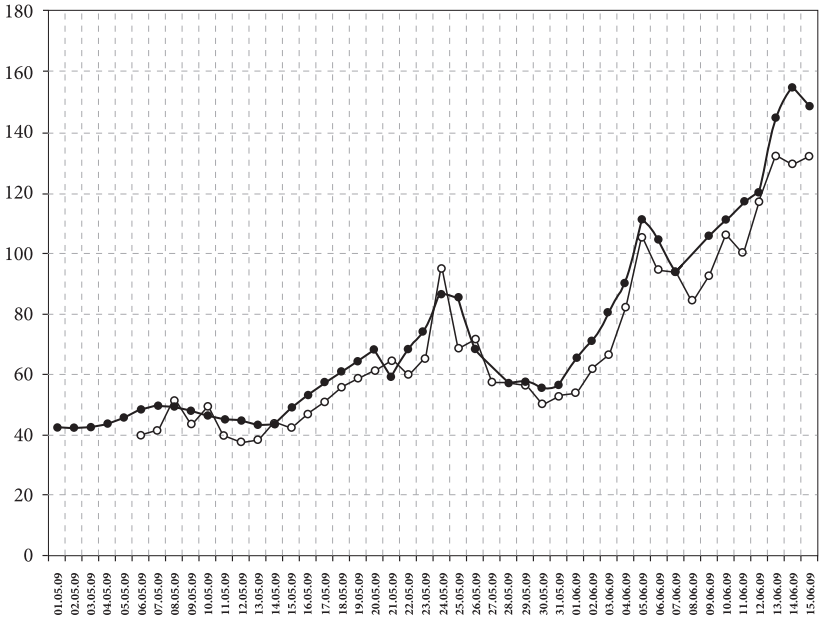


Рис. 4. Фактические (—●—) и спрогнозированные (—○—) значения ежедневных расходов воды р. Кубань у г. Теберда в июне 2009 г.

Физико-статистические методы прогнозов расходов воды в створах, расположенных на основном русле Кубани.

Для пяти гидрометрических створов, расположенных на основном русле р. Кубань — Коста-Хетагурово, Дегтяревский, Успенский, Армавир и Ладожская разработаны уравнения для прогноза ежедневных расходов воды с заблаговременностью 1 сутки, основанные на использовании гидрометрических данных. В качестве предикторов использованы суммы расходов воды на притоках, впадающих в Кубань выше каждого из названных створов, и расходы воды в замыкающем участок створе в день составления прогноза.

Входными створами первого участка (замыкающий створ Коста-Хетагурово) являются аул Верхний Уч-Кулан на р. Учкулан, аул Хурзук на р. Уллу-Кам и г. Теберда на р. Теберда. Выходной створ этого участка — свх. им. Коста-Хетагурово — служит одним из входных створов второго участка (замыкающий створ — х. Дегтяревский), а с. Маруха на р. Маруха и с. Хасаут-Греческое на р. Аксаут являются вторым и третьим входными створами на этом участке. Входными

Book_Gidromet.indb 420 13.01.2010 13:15:49

створами третьего участка (замыкающий створ с. Успенское) служат х. Дегтяревский и пгт. Архыз на р. Большой Зеленчук. На четвертом расчетном участке с замыкающим створом г. Армавир входными створами являются ст-ца Удобная на р. Уруп и с. Успенское на р. Кубань. Входными створами пятого участка с замыкающим створом ст-ца Ладожская являются г. Армавир на р. Кубань и ст-ца Удобная на р. Уруп.

Для прогнозирования расходов использовали уравнения линейного вида. Параметры определялись методом наименьших квадратов. В табл. 7 приведены уравнения для каждого из рассматриваемых створов на Кубани и оценки их эффективности S/σ.

Таблица 7

Уравнения и оценка их точности для прогнозов расходов воды р. Кубани с заблаговременностью одни сутки

№	Название поста	Уравнение	S/σ
1	Коста-Хетагурова	$Q_{t+1} = 0{,}413Q_t + 0{,}68\,\Sigma Q_{\text{П}} + 10{,}9$	0,32
2	Дегтяревский	$Q_{t+1} = 0{,}293Q_t + 0{,}36\,\Sigma Q_{\text{П}} - 16{,}5$	0,63
3	Успенская	$Q_{t+1} = 0{,}473Q_t + 0{,}51\,\Sigma Q_{\text{П}} + 13{,}8$	0,51
4	Армавир	$Q_{t+1} = -0{,}16Q_t + 1{,}21\,\Sigma Q_{\text{П}} + 9{,}3$	0,38
5	Ладожская	$Q_{t+1} = 0{,}50Q_t + 0{,}45\,\Sigma Q_{\text{П}} - 5{,}0$	0,35

Примечание. Q_{t+1} — прогнозируемый расход воды ($м^3/с$); Q_t — расход воды в в день составления прогноза, ($м^3/с$).

Проверка эффективности приведенных уравнений проводилась по четырем годам (1974, 1977, 1978 и 1985 гг.), в число которых вошли маловодный, многоводный и средний по водности годы. Оценки S/σ для рассматриваемых лет и створов меняются по годам в пределах 0,31—0,76. Следует отметить, что использование в прогностических уравнениях расходов воды в замыкающих створах повысили эффективность методов на 20—30%.

Заключение

Решение задачи прогноза опасных паводков в бассейне р. Кубань получено для частных водосборов и участков русла реки Кубань. При этом в соответствии с проведенным анализом условий формирова-

Book_Gidromet.indb 421 13.01.2010 13:15:49

ния стока, а также гидрометеорологической изученностью территории для частных бассейнов получены различные прогностические решения. Проведена оценка эффективности прогностических методик. На первом этапе получены результаты, показавшие возможность прогнозирования опасных паводков в бассейне р. Кубань. Учет дополнительных факторов, определяющих потери дождевых вод, исследование распределения осадков, выпадающих в период сильных дождей по пространству и во времени, а также описание процессов перемещения воды по поверхности бассейна и в руслах рек, позволят разработать более надежные схемы прогнозирования катастрофических наводнений в бассейне р. Кубань.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бефани Н.Ф.* Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 182 с.
2. *Мухин В.М., Полунин А.Я.* Методические указания к разработке метода краткосрочного прогноза расходов воды горных рек на основе математической модели формирования стока (на примере р. Карадарьи). М.: Гидрометеоиздат, 1982. 148 с.
3. *Полунин А.Я.* О моделировании процесса поступления воды на водосбор для краткосрочных прогнозов стока // Труды Гидрометцентра, 1988, вып. 295. С. 69—79.
4. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том I РСФСР, выпуск 1 «Бассейны рек северо-восточного побережья Черного моря, бассейн Кубани», Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 244 с.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР, том 8, Сев. Кавказ. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 448 с.

Book_Gidromet.indb 422 13.01.2010 13:15:50

Развитие информационного обеспечения Гидрометцентра России на базе технологического комплекса PROMETEI

И.Э. Пурина, И.И. Жабина, А.Ю. Недачина, Н.В. Дегтярева, И.В. Маковская
Гидрометцентр России

Решая первоочередные проблемы информационного обеспечения оперативных прогностических задач, Гидрометцентр России в течение ряда лет проводил работы по созданию собственного комплекса приема и обработки входного информационного потока от ЦКС «Москва», построению унифицированной информационной платформы. Для полноценного обеспечения Гидрометцентра России данными технология должна была включать все звенья обработки: сбор и контроль поступающей первичной информации и результатов прогностической деятельности других центров, их накопление, обработку и возможность доступа к ним потребителей, а также обеспечивать передачу произведенной в рамках автоматизированной системы оперативной обработки информации продукции в глобальные сети (ГСТ).

С принятием в 1990 году ВМО протокола FTP для передачи данных по сети ГСТ и появлением в ЛВС Гидрометцентра России ЭВМ CRAY Y-MP8E в качестве основного вычислителя в оперативную практику была введена первая собственная версия системы получения и обработки метеорологической информации, поступающей по каналам связи Росгидромета и ГСТ. Система выполняла ограниченный набор самых основных функций поиска и архивации. Поступление каждого файла отслеживалось. Как только файл поступал, он помещался в очередь на обработку. Очередь управлялась специальным планировщиком. Мелкие файлы укрупнялись и архивировались, и как только планировщик обнаруживал свободный процесс раскодирования, он передавал ему файл данных. Со временем неустойчивость в работе вычислителя породила необходимость резервирования входного потока данных на дополнительной ЭВМ (Xeon4). Проведенная техническая модернизация вычислительных мощностей Гидрометцентра России позволила создать полноценную

Book_Gidromet.indb 423 13.01.2010 13:15:50

резервную версию не только процесса приема, но и усвоения данных. Удалось поддержать полную идентичность полученных и произведенных данных на основной и резервной машине, что обеспечило оперативные и научно-исследовательские работы полной информационной базой. Эволюция технологии привела к построению развитых средств архивации данных различной степени обработки и возможности автоматически передавать эти архивы на другие вычислители или системы хранения. Наличие дублирующей ЭВМ сделало процесс приема достаточно сложным, что хорошо видно на рис. 1.

Появление в оперативной практике Гидрометцентра России двух равноценных по информационному обеспечению вычислителей Xeon4a и Xeon4b, взамен вышедшего из строя CRAY Y-MP8E, позволило существенно упростить схему приема, отказавшись от оперативного дублирования потоков данных системой приема. Каждый из вычислителей стал самостоятельным абонентом системы связи. Идентичность данных стала поддерживаться за счет идентичности входного потока. За последнее время существенно вырос и сам поток входной информации. Значительно выросло количество данных наблюдений и прогнозов зарубежных центров, появились данные в новых кодовых формах, например, BUFR. За несколько лет объем принимаемых данных увеличился со 100—120 Мб в сутки до 280—320 Мб и продолжает неуклонно расти. В последнее время бурно развивается международное сотрудничество в области обмена данными между прогностическими центрами. Эти данные по техническим причинам не могут распространяться в рамках ГСТ и сети Росгидромета, для них используются интернет-технологии (FTP-сервера). Для увеличения разнообразия данных и улучшения качества прогнозов погоды важно обеспечить возможность поиска и отбора данных с таких источников.

В отличие от сети Росгидромета, «публикующей» файлы данных в домашние директории процесса приема самостоятельно, FTP-сервера только хранят данные, и активной стороной в отборе данных с них выступает уже процесс приема. Для осуществления нового процесса отбора были разработаны и запущены процедуры опознавания внешних серверов, отслеживания поступления новых данных и «откачка» этих данных в домашние директории процесса приема. Кроме того, со временем, у Гидрометцентра России появились и свои потребности в «выкладывании» про-

Book_Gidromet.indb 424 13.01.2010 13:15:50

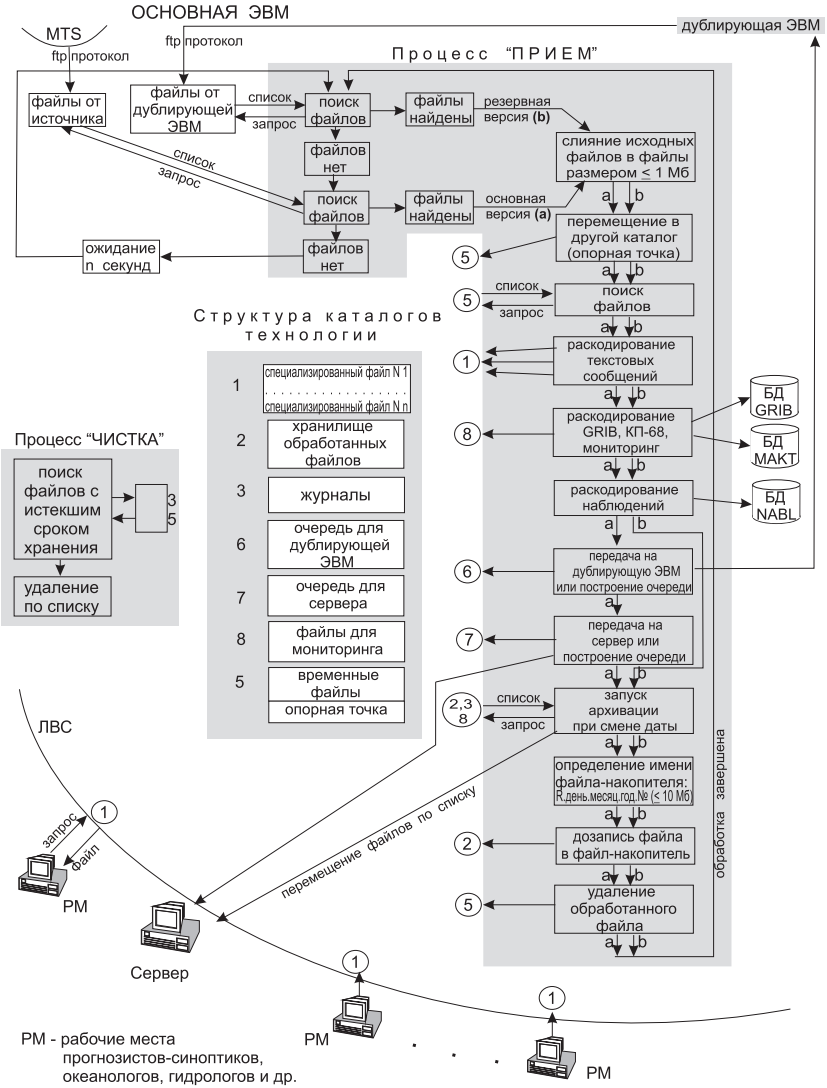


Рис. 1. Схема технологии «Прием» с дублирующей ЭВМ.

дукции на интернет-ресурсы, что сделало процесс взаимодействия с FTP-серверами двусторонним.

Очевидно, что проектировщикам системы приема приходится не только в деталях понимать, какова текущая архитектура информационной среды, но и какой она может быть завтра, чтобы организовывать прием поступающей информации наиболее эффективно. Для упрощения подключения новых источников требуется сделать систему открытой, параметризуемой и приспособляемой настолько, насколько это позволительно без потери устойчивости функционирования в целом. На данный момент такой баланс найден, и система приема демонстрирует высокую управляемость и отказоустойчивость. Рис. 2 представляет общую схему процесса.

Одновременно с технологией приема развивались и средства раскодирования данных как в алфавитно-цифровых кодах, так и в двоичных. Была поставлена задача полного поэлементного раскодирования всех основных кодовых форм, данные которых усваиваются прогностическими схемами, напрямую используются в оперативных подразделениях или представляют научный интерес. С появлением новых данных, передаваемых двоичным кодом BUFR, в процесс раскодирования удалось вовлечь новые, нетрадиционные и развивающиеся наблюдения, такие как спутниковые и радарные. Несмотря на значительно увеличившиеся накладные расходы по раскодированию таких данных, передаваемых по существу в свободных форматах, процесс подключения данных в коде BUFR к раскодированию не ограничивается. Объем и номенклатура продукции зарубежных метеоцентров в коде GRIB увеличивается постепенно, и программные средства ее раскодирования развиваются параллельно этому процессу. Одновременно формируются и собственные процедуры кодирования продукции Гидрометцентра России в коде GRIB с целью передачи данных в ГСТ. По мере роста «парка» крупных вычислителей в ЛВС возникла необходимость такого кодирования для передачи данных внутри самой ЛВС и формирования архивов. Надо сказать, что изначально процедуры раскодирования строго ориентировались на протоколы обмена ГСТ и АСПД Росгидромета, однако появление интернет-ресурсов, как новых источников информации, привело к необходимости вовлечения в процесс раскодирования данных, имеющих другие стандарты формирования и обмена. Чтобы хранить все возрастающий объем рас-

Book_Gidromet.indb 426 13.01.2010 13:15:51

Book_Gidromet.indb 427

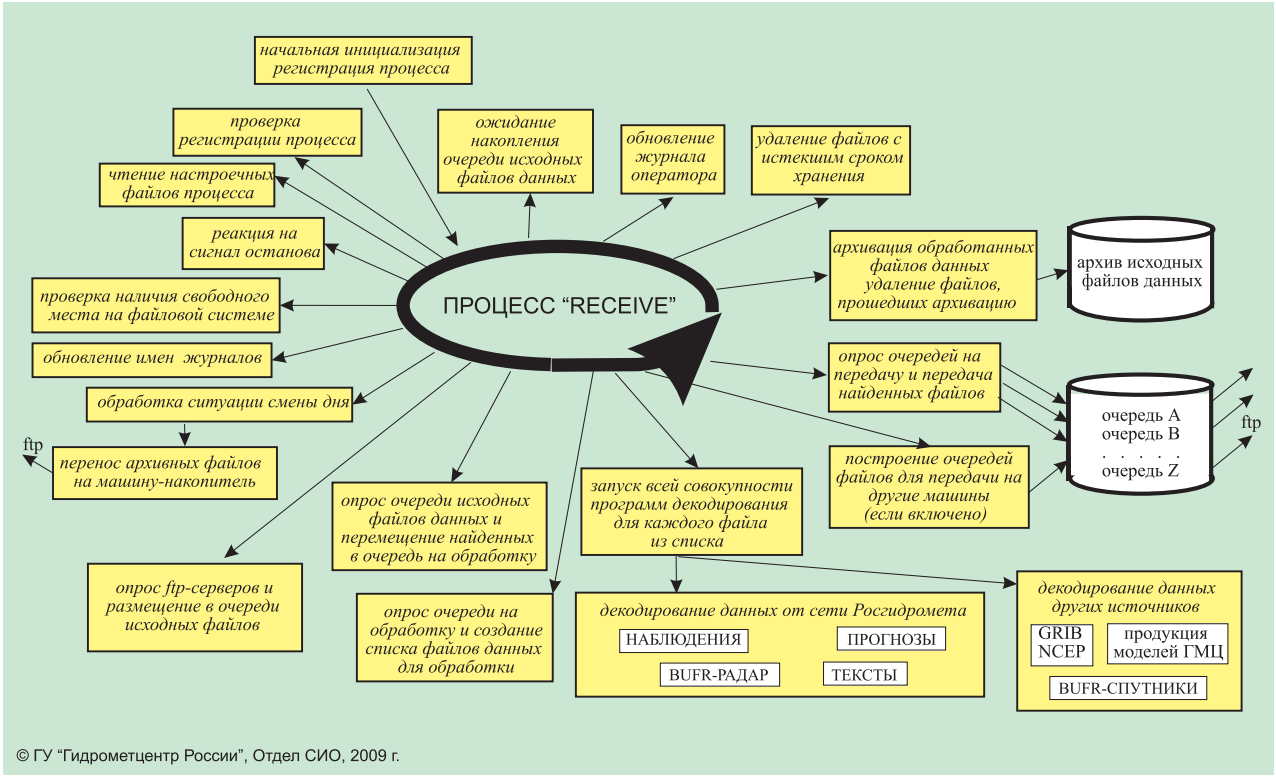


Рис. 2. Принципиальная схема технологии «Прием».

13.01.2010 13:15:52

Таблица 1

Информационный состав баз данных

Базы данных наблюдений	Включенные наблюдения
NABL гидрометеорологические наблюдения	Данные в буквенно-цифровых кодах SYNOP-FM12, SYNOP-FM14(Mobil), SHIP-FM13, FM18(BUOY), FM-62(TRACKOB), FM-63(BATHY), FM-64(TESAC), FM-33(PILOT-SHIP(A-D)), FM-32(PILOT(A-D)), FM-34(PILOT_MOBIL(A-D)) FM-35(TEMP(A-D)), FM-36(TEMP-SHIP(A-D)), FM-37(TEMP-DROP(A-D)), FM-38(TEMP-MOBIL(A-D), FM-41(CODAR), FM-42(AMDAR),AIREP, FM-88(SATOB), FM-86(SATEM(A)), FM-67(HYDRA), KN-24, KN-15, KH-02 (береговой код) FM-71(CLIMAT) , KH-19(ДЕКАДА) FM-75(CLIMAT-TEMP), осадки 24 и т.д. Распространяемые по глобальной сети и сети Росгидромета
AGRO агрометеорологические наблюдения	KH-21 (2008 г.)
BUFR (общее название ряда баз)	Отдельные виды наблюдений в коде BUFR, распространяемые по глобальной сети и из других источников
RADR	Радарные наблюдения, распространяемые по сети Росгидромета (отражаемость)
TEXT	База данных плоских циклических файлов обособленной текстовой информации
Анализы и прогнозы в коде GRIB	
RUMS-анализы и прогнозы спектральной модели ГМЦ, распространяемые по сети Росгидромета	
EGRR-анализы и прогнозы метеорологической службы Соединенного королевства (Великобритания — Экзетер), распространяемые по глобальной сети	
EDZW Региональный метеорологический центр , немецкая служба погоды (Оффенбах)	
ECMF-анализы и прогнозы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (Рединг)	
RJND Японское метеорологическое агентство (Токио)	
NCEP Национальный метеорологический центр США	

Book_Gidromet.indb 428 13.01.2010 13:15:52

кодируемой информации, в процесс проектирования и внедрения вводились новые базы данных и дополнительные сервисы в СУБД. Перечень наблюдений и прогностической продукции, получаемой процессом приема, отображен в таблице 1.

Стремительное совершенствование парка ЭВМ и средств связи привело к качественному изменению в подходах к организации вычислительных систем. Централизованные сети, основой которых были дорогие главные вычислители, постепенно трансформировались. Теперь роль центральной ЭВМ может выполнять уже не один, а несколько (порой — множество) достаточно мощных серверов, выполняющих наиболее трудоемкие процессы. В Гидрометцентре России количество самостоятельных достаточно производительных вычислителей под OS LINUX в ЛВС существенно увеличилось, кроме того, произошла смена поколения настольных персональных ЭВМ в подразделениях. Значительный объем НИР переместился с оперативных серверов в отделы, подразделения активно развивали специальное программное обеспечение под OS Windows.

Централизованные компьютерные системы требовали, чтобы все пользователи сети были пользователями главного вычислителя, если они хотели получить доступ к хранящимся на нем данным. Теперь есть множество серверов, на каждом из которых есть базы данных. Остро встал вопрос об обеспечении осуществляемых на них вычислений входной информацией и продукцией, производимой другими процессами на других вычислителях. Пользователь оказался перед проблемой поиска данных на множестве машин, среди большого числа разных операционных систем, различных программных средств доступа с различными интерфейсами. Рядовому пользователю работать непосредственно в такой разнородной прикладной среде трудно и неудобно, а пользователю-непрограммисту — просто невозможно. В таком же положении оказались и оперативные процессы: чтобы каждый вычислитель был обеспечен всей полнотой информации, необходимой для производства продукции, требовалось дублировать ее многократно. Используемая двухзвенная архитектура клиент-сервер умирала сама собой. Не было другого пути, кроме как научиться разумно управлять возникшим информационным пространством. Требовалось объединить все разрозненные базы данных и их СУБД, создать общий информационный ресурс и технологию, где этот ресурс предоставлялся бы пользователю как

Book_Gidromet.indb 429 13.01.2010 13:15:53

сервис, базирующийся на общих стандартах. Не имеет значения, где в ЛВС стоят сервера и на каких из них располагается информация, важно, что доступ к ней стандартный и комфортный независимо от того, обращается к ней пользователь-программист в среде OS Linux или в OS Windows. Для реализации такого подхода требовалось разработать и внедрить в СУБД стандарты обмена данными и на практике реализовать принцип трехзвенной архитектуры клиент-сервер. Важно было совершить определенный провыв в области межмашинной программной коммутации.

Чтобы информация была актуальной для каждого потребителя, она должна доставляться к нему по запросу — в точности тогда, когда он в ней нуждается. В разнородных сетях технически невозможно организовать доступ каждого потребителя к каждой базе данных, организуя его через разделяемые ресурсы (клиент-сервер), да и пропускная способность сетей не беспредельна. При числе одновременно работающих пользователей более 30 необходимо менять идеологический подход к информационному обеспечению и переходить на так называемую «трехзвенную архитектуру клиент-сервер». В трехзвенной архитектуре всю логику работы с базами данных можно переложить на новый, отделенный от пользователя программный модуль-сервер приложений. Это программа, функционирующая на том же вычислителе, на котором располагаются базы данных. Для ее функционирования локальная сеть должна использовать стандартный TCP/IP-протокол как типичный механизм реализации связи между различными ЭВМ. Сервер приложений постоянно находится в ожидании запроса для исполнения, используя процедуру прослушивания зарезервированного порта, и полагает, что любые сообщения, посланные этому порту, предназначены для поиска данных в базах данных. Как только такой запрос поступает, активизируется программа интерпретации запроса и поиск нужной базы. Если база найдена, происходит обращение к системе управления базой данных, запрос передается ей на исполнение. Сервер приложений удерживает связь с ЭВМ пользователя, приславшего запрос, до получения отобранных данных в свое распоряжение, после чего осуществляет обратную транзакцию, пересылая результат запроса пользователю. В результате в сеть передаются только те данные, которые требуются.

Очевидно, чтобы реализовать такой метод связи, пользователю нужна помощь. В качестве такой помощи выступает

Book_Gidromet.indb 430 13.01.2010 13:15:53

программа «клиент запроса» — унифицированный интерфейс, вызываемый обычно, как библиотечная подпрограмма. «Клиент» должен уметь составить запрос в формате, принимаемым сервером приложений, инициировать сеанс связи с удаленным сервером, послать запрос на сервер, поддерживать связь до того момента, когда ответ от сервера будет получен, и передать данные в программу пользователя. При таком подходе пользователю нет необходимости что-либо знать об особенностях аппаратной платформы и операционной системе сервера баз данных, не надо получать прав доступа на главных вычислителях, поскольку он имеет дело только с «клиентом», который умеет делать все необходимое сам. Теперь персональный компьютер пользователя превращается в единственный и полноценный инструмент для работы. Можно использовать всю мощь его программного обеспечения, не превращать свой ПК в удаленный терминал главного вычислителя. Все программы пишутся и отлаживаются на собственной машине, а данные можно читать (или записывать) из оперативных баз.

Трехзвенная клиент-серверная архитектура межмашинного взаимодействия в полной мере применима и для связи по данным между несколькими главными вычислителями. Нет разницы, где работает «клиент» — на оперативном сервере или на персональном компьютере. Это открывает новые возможности в организации «разделения труда» оперативных технологий: один сервер принимает, раскодирует данные и хранит их в базах данных и архивах, на другом — выполняются оперативно-прогностические и ресурсоемкие научные вычисления, третий занимается формированием выходной продукции для системы связи и обеспечивает данными внешних потребителей, сайты, FTP-сервера и т.д. Теперь при переносе прикладных программ пользователя с одной вычислительной платформы на другую не требуется что-либо изменять в операторах доступа к данным. Возможность получать и передавать данные одним интерфейсом позволила связать информацию, расположенную в разных узлах сети, в соответствии с естественным порядком ее создания и потребления, осуществить единообразный доступ. Это путь, которым идут все организации, имеющие дело с масштабной обработкой и производством информации.

Чтобы завершить процесс создания корпоративной информационной системы, оставалось обеспечить данными конечных

Book_Gidromet.indb 431 13.01.2010 13:15:54

пользователей. Конечный пользователь — это всегда специалист, для которого важно быстро и в определенном виде увидеть интересующие его данные. Никаких самостоятельных действий по их обработке на вычислительных машинах он не производит. Таблицы, графики, диаграммы, текстовые документы — вот та продукция, которая ему нужна. Ему нужно знать о данных лишь то, что они доступны с его рабочего места. Такой пользователь должен иметь возможность формулировать свои информационные запросы на доступном ему языке, поэтому необходима некая компонента системы обработки данных, которая обеспечит взаимодействие серверов баз данных с таким пользователем на приемлемом для него уровне. Традиционно такой сервис имеет название «рабочее место специалиста».

В тесном взаимодействии со специалистами был выполнен целый ряд разработок, базирующийся на потребностях различных подразделений Гидрометцентра России. В основе каждой такой разработки находится «клиент запроса» и визуальный интерфейс, наиболее полно отражающий методы обработки и представления требуемой информации. Все РМ снабжены механизмами настройки параметров управления, что позволяет пользователю получать все данные заданного типа хранения с одного РМ простым выбором управляющих кнопок. Наличие жестких правил формирования запросов «клиентом» и ответов «сервером» позволяет создать интегрированные РМ на основе унифицированного «дружественного» визуального интерфейса. Нет необходимости переучиваться, переходя от одного РМ к другому: функции, выполняемые при нажатии одноименных кнопок, тоже одинаковые или очень близкие по смыслу. Во все РМ заложен общий принцип подхода к полученным данным: все, что уже прочитано с сервера баз данных, должно сохраняться в архиве пользователя, если только пользователь осмысленно не откажется от этого. Личные электронные архивы — ценный материал для анализа.

Сегодня можно констатировать, что большинство подразделений активно пользуется созданным объединенным информационным ресурсом, число «рабочих мест» неуклонно возрастает, а существующие — постоянно модернизируются. К определенному моменту большинство поставленных задач было решено, и все созданные наработки можно было объединить в технологический комплекс. Результатом многолетней и активной работы

Book_Gidromet.indb 432 13.01.2010 13:15:54

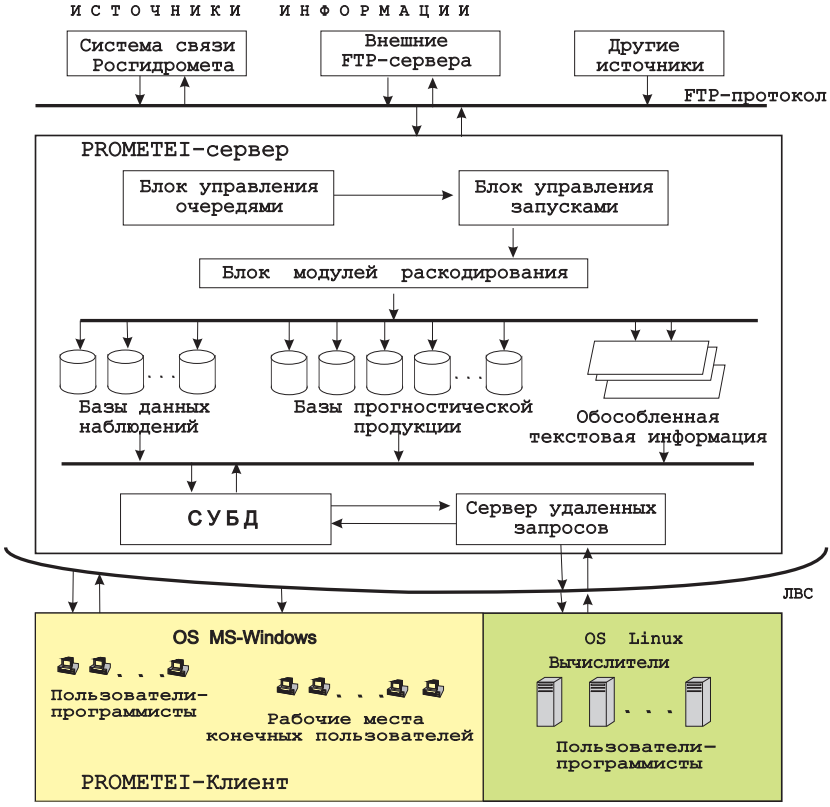


Рис. 3. Принципиальная схема программного комплекса обработки гидрометеорологической информации PROMETEI.

Отдела систем информационного обеспечения сегодня является программный комплекс обработки гидрометеорологической информации PROMETEI (PROcessing METEorological Infomation), принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

PROMETEI создан для получения и предоставления потребителю информации в локальной вычислительной сети любой степени сложности. Источниками информации для PROMETEI является система связи Росгидромета, Интернет, любые другие внешние источники, передающие гидрометеорологические наблюдения и продукцию в виде файлов по протоколу FTP. Комплекс включает две технологии;

Book_Gidromet.indb 433 13.01.2010 13:15:54

– PROMETEI-сервер, функционирующий в среде OS Linux;

– PROMETEI-клиент, функционирующий под OS Ms Windows и OS Linux.

PROMETEI-сервер обеспечивает получение заказанной номенклатуры метеорологической информации от центра коммутации сообщений (МТС, UniMAS, Митра), интернет-серверов и других источников, ее раскодирование и хранение в специализированных базах данных, а также выполняет роль сервера баз данных в локальной сети.

PROMETEI-клиент обеспечивает сетевой доступ с рабочих мест специалистов (под OS Windows) и программный доступ с других вычислителей в сети (под OS Linux) к серверам баз данных. Включает широкий спектр рабочих мест конечных пользователей и программные средства удаленного доступа к данным для программистов.

PROMETEI — это сервис, включающий целый спектр оригинальных разработок в области построения систем накопления и навигации гидрометеорологической информации. Сервис предоставляет потребителю широкий диапазон инструментальных средств, объединенных в стандартные и индивидуальные наборы, унифицированные диалоги и разноуровневую графику. Сервис реализован для конечных пользователей в формате рабочих мест для визуализации данных с различной степенью детализации.

Сегодня PROMETEI — это основа информационного обеспечения Гидрометцентра России.

Book_Gidromet.indb 434 13.01.2010 13:15:55

АСООИ-XEON4 — многомашинная оперативная автоматизированная технология ГУ «Гидрометцентр России», предназначенная для информационного обеспечения, регламентированного счета и формирования продукции различных прогностических моделей

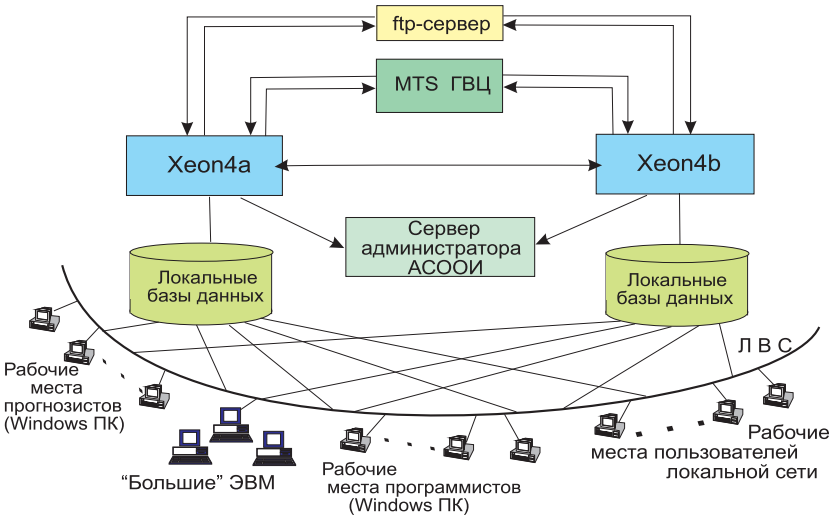
Ю.А. Степанов, И.И. Жабина
Гидрометцентр России

Гидрометцентр России имеет большой опыт в создании и развитии автоматизированных систем и технологий оперативной обработки информации (АСООИ). Главное назначение автоматизированных технологий состоит в организации централизованного регламентированного счета прогностических и прикладных задач и обеспечении их взаимодействия посредством баз данных коллективного пользования. Все прогностические и прикладные задачи объединяются в централизованный банк задач. Неотъемлемой частью технологии являются программные комплексы приема и раскодирования входной гидрометеорологической информации и формирования выходной продукции, предназначенной для локального использования и распространения в глобальных сетях. Результаты оперативной эксплуатации в Гидрометцентре России автоматизированных технологий АСООИ, а также систем их информационного обеспечения показали работоспособность, высокую надежность и востребованность потребителями.

В настоящее время в Гидрометцентре России успешно и надежно функционирует технология АСООИ-Xeon4 на платформе 4-процессорных серверов Xeon. Сервер Xeon4b является основным, а сервер Xeon4a является его горячим резервом. Технологии АСООИ-Xeon4b и АСООИ-Xeon4a взаимно резервирующие. Их разработка велась в 2002—2007 гг. Общая схема трехмашинной технологии АСООИ-Xeon4 приведена на рис. 1. Данная технология пришла на смену предыдущей одномашинной технологии АСООИ-CRAY, разработанной и функционировавшей в 1998—2005 гг. на ЭВМ CRAY Y-MP8E [1, 4, 5] и предшествующей технологии АСООИ-ЕС [2, 3].

АСООИ-Xeon4 является **технологией корпоративного уровня**, предназначенной для обеспечения комплексной, централизованной,

Book_Gidromet.indb 435 13.01.2010 13:15:55



© ГУ "Гидрометцентр России", Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 1. Аппаратная основа сетевой инфраструктуры технологии АСООИ-Xeon4 Гидрометцентра России.

автоматизированной обработки, использования, хранения и распространения разнообразной гидрометеорологической информации в рамках различных **предметных областей деятельности Гидрометцентра России**. Эта технология состоит из нескольких больших взаимодействующих компонентов (подтехнологий и подсистем), разработанных в **Отделе Систем Информационного обеспечения (ОСИО)** Гидрометцентра России.

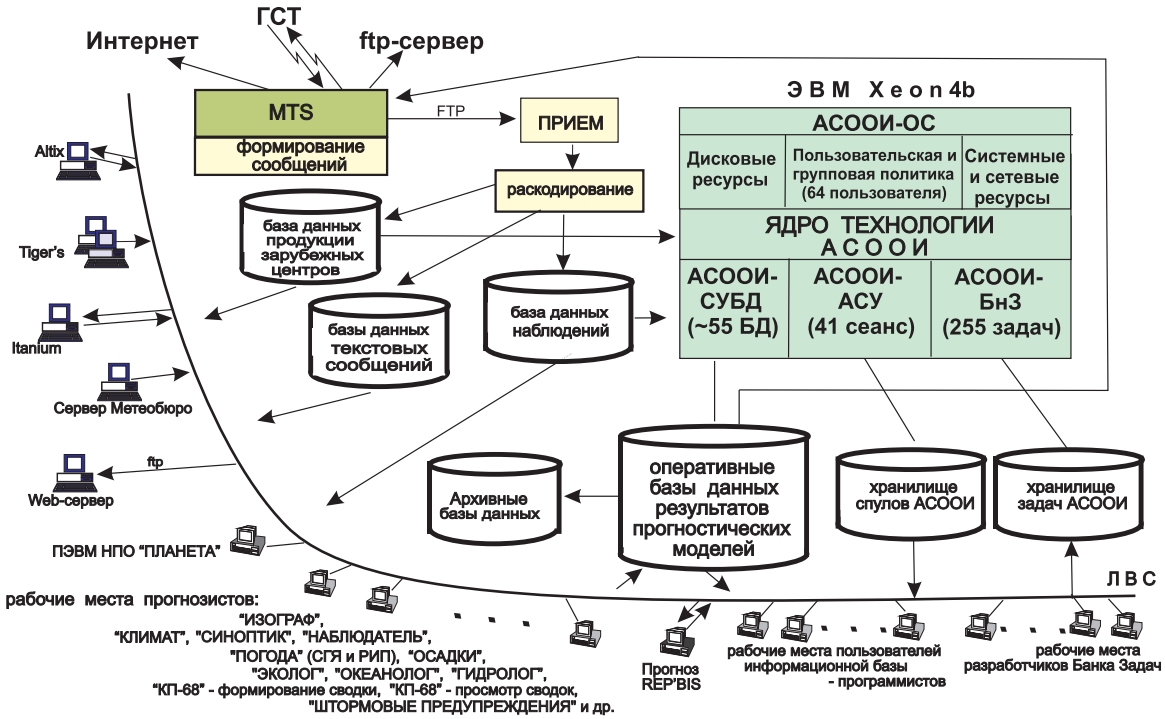
Технология АСООИ-Xeon4 является, с одной стороны, составной частью общей сетевой инфраструктуры ММЦ в г. Москве, а с другой — информационной основой многопользовательской сетевой инфраструктуры Гидрометцентра России. Эта технология является связующей программно-аппаратной средой между обеими инфраструктурами и реализует информационное обеспечение внутренних и внешних потребителей оперативной прогностической продукции Гидрометцентра России.

Технология АСООИ-Xeon4 условно состоит из двух больших предметных областей:

1. *Ядро технологии.* Разработано и функционирует на каждом из главных вычислителей Xeon4b и Xeon4a, все функциональные воз-

Book_Gidromet.indb 436 13.01.2010 13:15:56

Book_Gidromet.indb 437



© Гидрометцентр России, Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 2. Общая схема информационного обеспечения оперативных технологий, НИР и рабочих мест специалистов Гидрометцентра России на базе ЭВМ Xeon4b.

13.01.2010 13:15:56

можности ядра реализованы в рамках этих ЭВМ и очень сильно интегрированы между собой.

2. *Смежные технологии.* Интегрируются с ядром посредством СУБД АСООИ и могут быть функционально независимы от ядра, в том числе функционировать вне главных вычислителей.

На рис. 2 представлена общая схема организации ресурсов ядра и смежных технологий на основном вычислителе — сервере Xeon4b. В настоящей статье рассматривается только ядро технологии АСООИ-Xeon4 (состояние на 20.11.2009 г.).

Ядро технологии АСООИ-Xeon4 состоит из следующих подтехнологий

АСООИ-СУБД — централизованные *информационные базы данных* Гидрометцентра России общего и специализированного назначения. Является унифицированной средой хранения разнообразной структурированной информации различных предметных областей Гидрометцентра России.

АСООИ-БнЗ — банк оперативных задач, содержащий все оперативно-значимое *прикладное программное обеспечение* различных предметных областей Гидрометцентра России. Является централизованным, масштабируемым, строго унифицированным и структурированным хранилищем всех задач технологии АСООИ.

АСООИ-АСУ — автоматизированная система *управления вычислительным процессом*; осуществляет управление оперативными, администраторскими и пользовательскими вычислительными процессами и ресурсами технологии АСООИ-Xeon4. Является связующей управляющей средой (middleware) между АСООИ-СУБД и АСООИ-БнЗ.

АСООИ-ОС — *системное администрирование всех ресурсов* технологии АСООИ (оперативных, администраторских, пользовательских, системных, сетевых и смежных ресурсов).

Смежные технологии

АСООИ-ПРИЕМ — прием метеорологических данных и текстовых сообщений различных типов. Раскодирование данных наблюдений, продукции зарубежных центров, прогнозов региональных центров.

Book_Gidromet.indb 438 13.01.2010 13:15:56

АСООИ-ГРАФИКА — графическое представление продукции АСООИ-Xeon4.

АСООИ-ПЕРЕДАЧА — формирование продукции Гидрометцентра России и передача ее потребителям в ГСТ, АСПД и на FTP-серверы в кодовых формах GRIB, GRID и в текстовом формате.

АСООИ-АРХИВ — архивация данных, сформированных в рамках технологии АСООИ-Xeon4.

Организацию вычислительного процесса на сервере коллективного использования можно условно представить в виде нескольких общих схем. Рассмотрим кратко три такие схемы в порядке возрастания сложности.

На рис. 3 представлена ***односвязная*** схема, для которой характерны следующие показатели:

– *Связь по данным.* Согласовывается, разрабатывается, реализуется пользователями ЭВМ без посредников.

– *Связь по управлению.* Также полностью в компетенции этих пользователей.

– *Ресурсообеспеченность.* В компетенции как пользователей, так и «хозяина» ЭВМ.

Масштабируемость такой схемы достаточно низкая.

На рис. 4 представлена ***двухсвязная*** схема, для которой характерны более комплексные показатели:

– *Связь по данным.* Согласовывается, разрабатывается и реализуется пользователями (разработчиками приложений) и Администраторами централизованных БД. Чем «больше» группы Приложений, тем более значима роль централизованного администрирования СУБД.

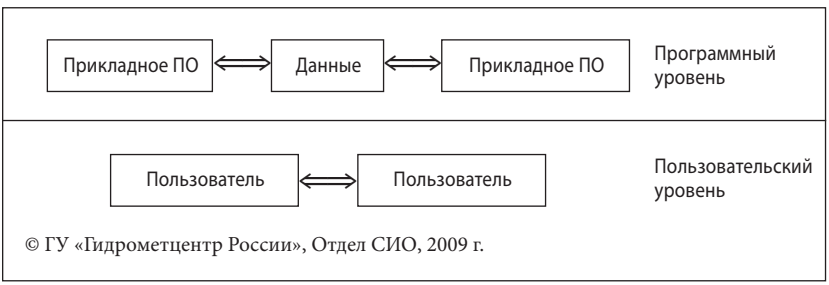


Рис. 3. Односвязная схема вычислительного процесса (классическая НИР).

Book_Gidromet.indb 439 13.01.2010 13:15:57

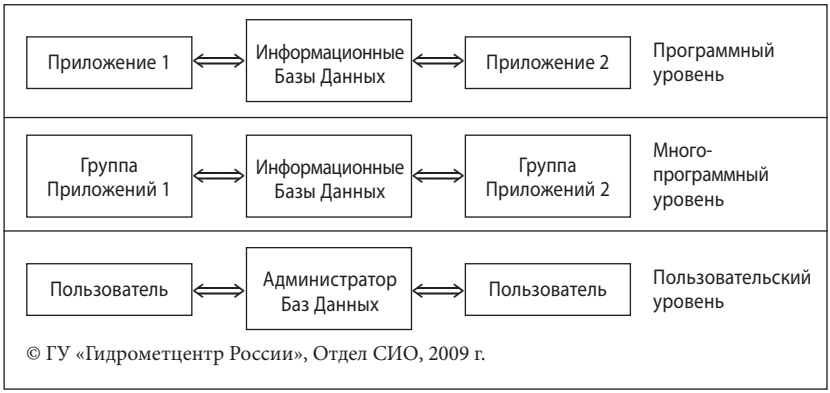


Рис. 4. Двухсвязная схема вычислительного процесса (НИР + СУБД).

– *Связь по управлению*. Полностью в компетенции пользователей, в том числе и обеспечение регулярного счета.

– *Ресурсообеспеченность по данным*. Согласовывается и осуществляется централизованно, «по вертикали», и отделена от пользователей.

– *Ресурсообеспеченность по управлению*. Согласовывается пользователями и «хозяином» ЭВМ в «индивидуальном порядке».

Масштабируемость такой схемы определяется, в первую очередь, возможностями развития, поддержания и администрирования СУБД.

На рис. 5 представлена ***трехсвязная*** схема, являющаяся наиболее комплексной и сложной. Основные характеристики такой схемы следующие:

– *Связь по данным*. Аналогична двухсвязной схеме.

– *Связь по управлению*. Согласовывается, разрабатывается и реализуется пользователями и Администраторами АСУ; чем «больше» множества приложений, тем более централизованной должна быть эта связь, и тем более значима роль централизованного администрирования системы управления вычислительным процессом.

– *Ресурсообеспеченность по данным*. Аналогична двухсвязной схеме.

– *Ресурсообеспеченность по управлению*. Согласовывается и осуществляется централизованно, «по вертикали», и во многом отделена от пользователей.

Масштабируемость и управляемость такой схемы определяется как возможностями развития, поддержания и администрирова-

Book_Gidromet.indb 440 13.01.2010 13:15:57

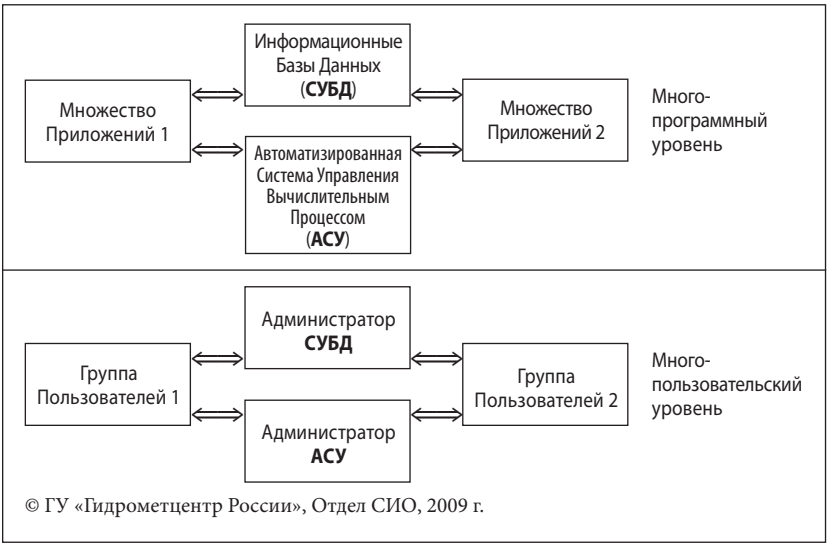


Рис. 5. Трехсвязная схема вычислительного процесса (НИР + СУБД + АСУ).

ния СУБД, так и возможностями развития, поддержания и администрирования АСУ.

На основе трехсвязной схемы вычислительного процесса можно построить трехзвенную архитектуру управления, которую принято называть ”Middleware” («Связующая среда»). В общем виде парадигма Middleware представлена на рис. 6.

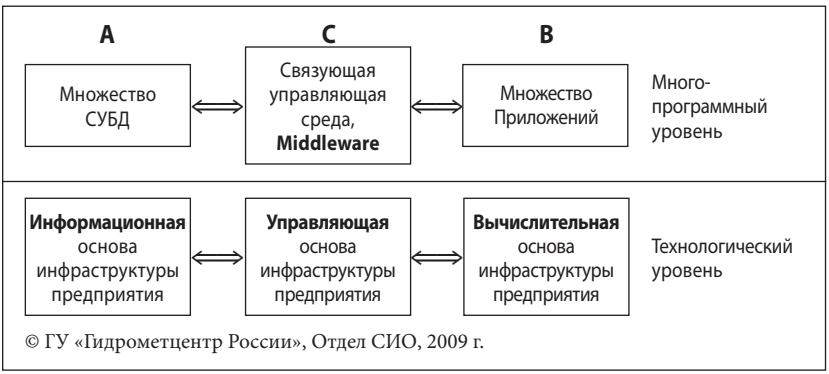


Рис. 6. Трехзвенная архитектура управления и парадигма Middleware.

Book_Gidromet.indb 441 13.01.2010 13:15:58

Основой оперативного вычислительного процесса являются множества **A** и **B**. Чем многообразнее эти множества (как количественно, так и качественно), тем сложнее внутреннее устройство части **C**. ***Масштабируемость*** множеств **A** и **B** вызывает необходимость увеличения множества функциональных возможностей и внутренней строгости Middleware, которые максимально «скрыты» от пользователей и разработчиков Приложений. В то же время, чтобы связка A-C-B была устойчивой, управляемой, надежной, эффективной, необходимы очень строгие правила интеграции этих множеств в условиях большой масштабируемости.

Если множества **A** и **B** количественно «малы» и не предполагается их существенное развитие (масштабирование), то часть **C** может показаться «искусственной», неоправданной, вносящей излишнюю сложность в общую систему, контрпродуктивной. В этом аспекте разработка Middleware не имеет смысла.

В «больших» корпоративных технологиях АСООИ-CRAY, АСООИ-Xeon4a, АСООИ-Xeon4b реализована и используется на практике **трехзвенная архитектура собственной разработки Гидрометцентра России.**

Основные характеристики и особенности Middleware, реализованной в рамках технологии АСООИ-Xeon4, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные особенности Middleware для Гидрометцентра России

1.	**N-мерная (нелинейная)** масштабируемость множества **A**; $N \geq 1$
2.	**M-мерная (нелинейная)** масштабируемость множества **B**; $M \geq 1$
3.	**M*N-мерное** возрастание уровня сложности множества **C**
4.	Связка **A-C-B** должна обеспечивать **надежную масштабируемость** инфраструктуры Гидрометцентра России: устойчивая, управляемая, эффективная, мобильная (портируемая), автоматизированная
5.	**Трехзвенная архитектура A-C-B** полностью «с нуля» разработана в Гидрометцентре России
6.	Внутренняя организация множества **C полностью скрыта** от пользователей ЭВМ
7.	Внутренняя организация множества **A частично открыта** для пользователей ЭВМ
8.	Внутренняя организация множества **B полностью открыта** для пользователей Middleware

© ГУ «Гидрометцентр России», Отдел СИО, 2009 г.

Book_Gidromet.indb 442 13.01.2010 13:15:58

Таблица 2

Смысл и назначение ядра технологии АСООИ-Xeon4 Гидрометцентра России

1.	**Ядро АСООИ** является полнофункциональной реализацией трехзвенной архитектуры Middleware
2.	**Централизация информационных** ресурсов Гидрометцентра России
3.	Эффективное **централизованное управление** этими ресурсами (оперативное и неоперативное)
4.	**Высокий уровень автоматизации** оперативного вычислительного процесса (в том числе автозапуск сеансов)
5.	Надежное, гибкое, эффективное **сопровождение и развитие** этих ресурсов
6.	Унификация и автоматизация процессов **разработки приложений АСООИ**
7.	Обеспечение **масштабируемости и мобильности ПО** в условиях многомашинной конфигурации оперативного вычислительного процесса

© ГУ «Гидрометцентр России», Отдел СИО, 2009 г.

Таким образом, принципиальный смысл и назначение ядра технологии АСООИ-Xeon4 можно представить в виде таблицы 2.

Место Middleware внутри программно-аппаратной платформы Xeon4b можно представить в виде рис. 7.

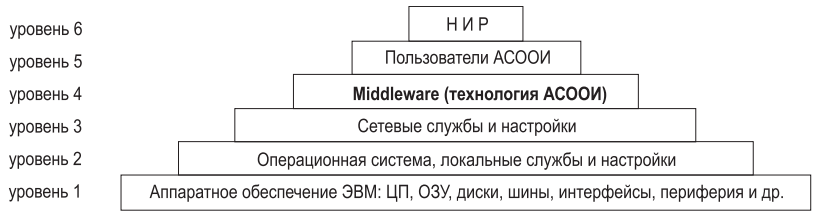
Главное в этой иерархии следующее:

1. ***уровень 4*** является интегрирующей, связующей средой между ***уровнями 6 и 2***;

2. особенности ***системного и прикладного ПО*** скрыты внутри Middleware;

3. ***пользователи АСООИ*** фактически имеют дело только с ресурсами Middleware;

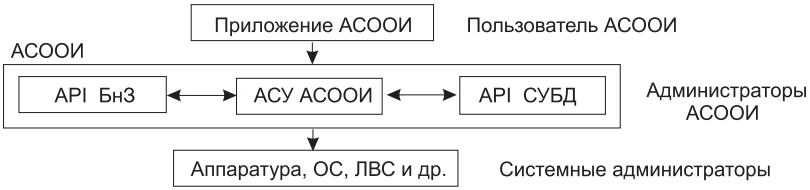
4. пользователи НИР имеют дело с уровнями 3, 2, 1, т.е. классическим способом.



© ГУ "Гидрометцентр России", Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 7. Иерархия вычислительных и административных ресурсов ЭВМ.

Book_Gidromet.indb 443 13.01.2010 13:15:59



© ГУ "Гидрометцентр России", Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 8. Взаимодействие пользователя АСООИ с ресурсами Middleware и с системными ресурсами.

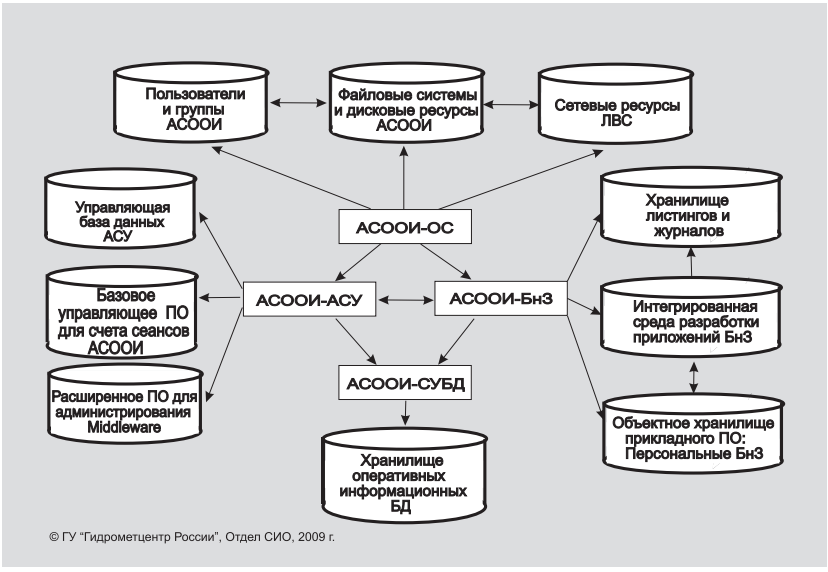


Рис. 9. Общая структура трехзвенной архитектуры Middleware ядра технологии АСООИ-Xeon4b.

Распределение зон ответственности внутри и снаружи Middleware можно представить в виде рис. 8.

Главное в этой схеме следующее:

1. механизм ***взаимодействия по данным*** реализован посредством API СУБД;

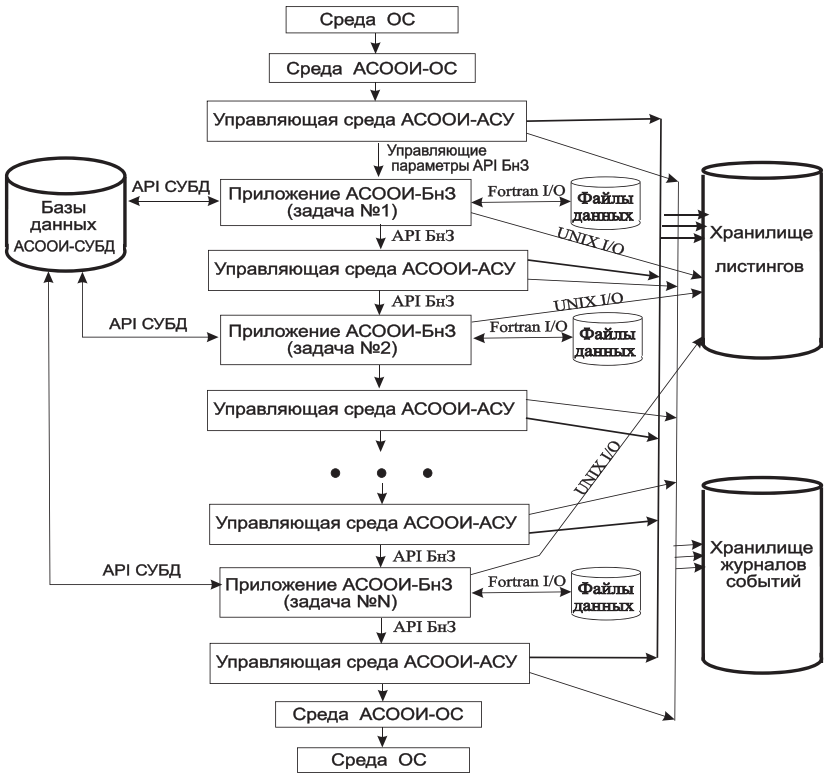
2. механизм ***взаимодействия по управлению*** реализован посредством АСООИ-АСУ и API Банка Задач;

Book_Gidromet.indb 444 13.01.2010 13:15:59

3. **API** — Application Programming Interface (интерфейс прикладного программирования).

Далее в настоящей статье кратко рассматривается «с высоты птичьего полета» устройство и реализация ядра технологии АСООИ-Xeon4b, а также его многомашинная версия. На рис. 9 представлены компоненты ядра АСООИ-Xeon4b и их взаимодействие друг с другом.

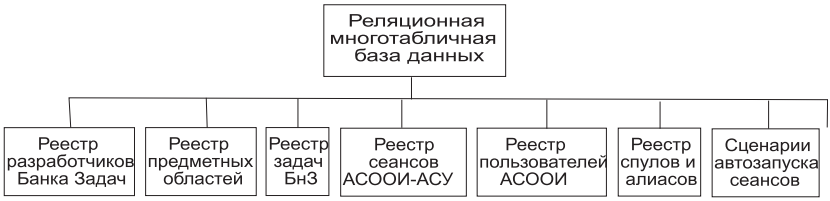
Основным механизмом счета задач, входящих в состав АСООИ-БнЗ, являются сеансы последовательной обработки данных. Сеанс АСООИ-АСУ является составной транзакцией, состоящей из последовательности одиночных транзакций, реализованных в виде задач АСООИ. Общая структура сеанса АСООИ представлена на



© ГУ "Гидрометцентр России", Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 10. Общая структурная схема сеанса технологии АСООИ-Xeon4b.

Book_Gidromet.indb 445 13.01.2010 13:15:59



© ГУ "Гидрометцентр России", Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 11. Управляющая база данных АСООИ-АСУ технологии АСООИ-Xeon4b.

рис. 10. Управляющая среда АСООИ-АСУ реализована на языках программирования KornShell, Python и Fortran с использованием множества утилит ОС Linux. Для каждой задачи и сеанса имеется свой спул листингов и журналов, а также ведется единый супержурнал событий. Цикл ротации листингов составляет 8 суток, но может быть установлен индивидуально для каждого сеанса. Цикл ротации журналов равен 100 000 записей и устанавливается администратором АСУ.

Конфигурация управляющей среды АСООИ-АСУ реализована в виде управляющей базы данных. Управляющая база данных АСООИ-АСУ, в том числе программные средства доступа, является полностью собственной разработкой Гидрометцентра России. Развитие, конфигурирование и модификации этой БД осуществляются администратором АСООИ-АСУ, содержание ее полностью закрыто от пользователей АСООИ. Структура управляющей БД представлена на рис. 11.

Сводные количественные характеристики ядра технологии АСООИ-Xeon4b, относящиеся к оперативному вычислительному процессу Гидрометцентра России, приведены в табл. 3 и показывают степень масштабируемости и многомерности технологии АСООИ-Xeon4b. Эта масштабируемая среда обеспечивается (как алгоритмически, так и программно-аппаратно) многоуровневой организацией ресурсов и программного обеспечения ядра АСООИ-Xeon4b, представленной на рис. 12.

Для повышения надежности и отказоустойчивости работы ядра технологии АСООИ-Xeon4b в Гидрометцентре России в Отделе СИО была разработана и реализована многомашинная версия Middleware. На рис. 13 представлена общая схема поддержания/резервирования многомашинной архитектуры технологии АСООИ-Xeon4b Гидрометцентра России. Сокращения

Book_Gidromet.indb 446 13.01.2010 13:16:00

Таблица 3

Общая характеристика оперативно-значимых ресурсов подтехнологий АСООИ-ОС, АСООИ- АСУ, АСООИ-БнЗ на сервере Xeon4b

№	Характеристика ресурса	Количество
1.	Оперативные базы данных АСООИ-СУБД: Объем (ГиБ) Количество каталогов = количество БД Количество файлов	 ~60 55 165
2.	Количество оперативных задач в АСООИ-БнЗ	250
3.	Количество оперативных сеансов в АСООИ-АСУ	36
4.	Количество запусков оперативных задач в течение суток	925
5.	Количество запусков оперативных сеансов в течение суток	76
6.	Общее количество оперативных событий АСООИ-АСУ в течение суток в штатном режиме. Событиями АСУ является старт либо окончание сеанса или задачи	2002
7.	Количество предметных областей Гидрометцентра России	21
8.	Количество пользователей — разработчиков приложений АСООИ-БнЗ. У каждого пользователя имеется персональный Банк Задач, изначально созданный администратором АСООИ-БнЗ и АСООИ-ОС	20
9.	Количество пользователей оперативных спулов АСООИ. Спулы являются автоматизированными циклическими хранилищами листингов и журналов событий для всех задач и сеансов АСООИ	32
10.	Количество пользователей ЭВМ, имеющих доступ к ресурсам ядра АСООИ (в том числе к спулам и СУБД). Учетные записи и ресурсы для пользователей обслуживаются администратором АСООИ-ОС	64
11.	Оперативный Банк Задач: Объем (ГиБ) Количество каталогов Количество файлов	 7,5 ~1080 ~10300
12.	Оперативные спулы сеансов и задач: Объем (ГиБ) Количество каталогов Количество файлов	 3,5 ~3500 ~117000

№	Характеристика ресурса	Количество
13.	Администраторский Банк Задач: Объем (ГиБ) Количество каталогов Количество файлов	 2,5 ~2300 ~21600
14.	Количество администраторских задач в АСООИ-БнЗ	5
15.	Количество администраторских сеансов в АСООИ-АСУ	5
16.	Количество запусков администраторских сеансов в течение суток. Администраторские сеансы и задачи осуществляют автоматизированный сбор, обработку, форматирование и представление многоуровневой информации о состоянии и функционировании всех программно-аппаратных ресурсов ядра технологии АСООИ	54

© ГУ «Гидрометцентр России», Отдел СИО, 2009 г.

над стрелками обозначают следующие функциональные возможности:

CP — копирование частичное (Copy Partial);

RP — репликация частичная (Replication Partial);

RF — репликация полная, зеркалирование (Replication Full, Mirroring);

B — резервное копирование (Backup);

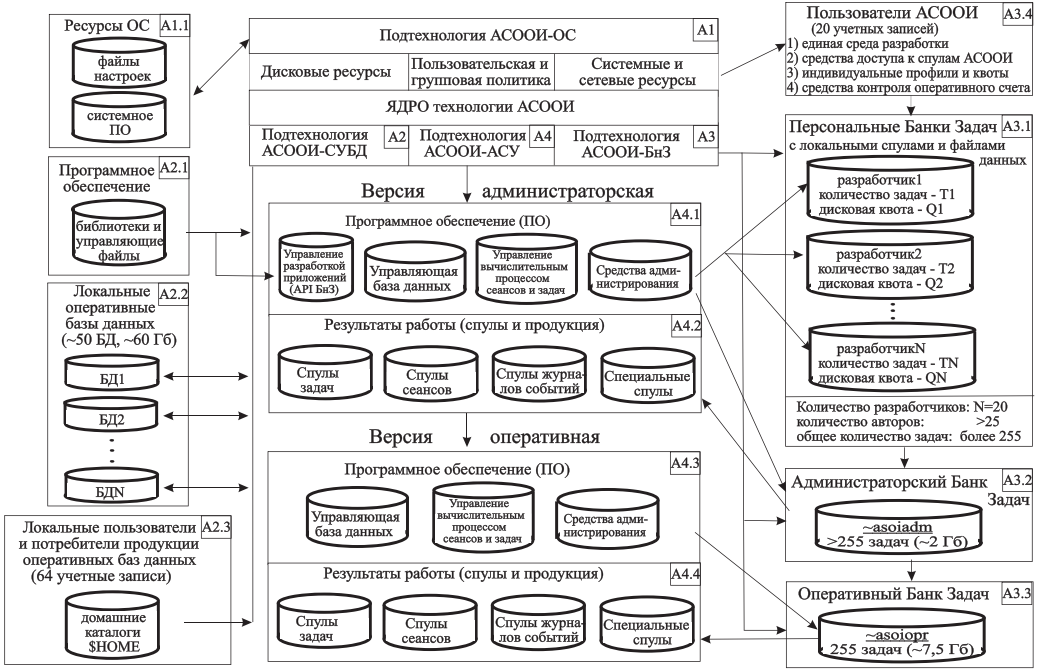
M — ручное управление (Manual Control);

A — автоматическое управление (Automatic Control).

Резервное копирование (ручное и автоматическое) и репликация осуществляются посредством ***собственных сетевых технологий***, разработанных в ОСИО Гидрометцентра России. Здесь используются расширенные средства администрирования (см. рис. 9), разработанные и реализованные на языках программирования KornShell и Python с использованием многофункциональных средств ОС Linux, включая привилегированные утилиты. Все операции резервного копирования являются неинкрементными в связи с недостатком адекватных программно-аппаратных ресурсов администратора.

Таким образом, технология АСООИ-Xeon4 является открытой системой, которая позволяет унифицированным способом добавлять новые прогностические и специализированные задачи в банк задач, модифицировать существующие задачи, конфигурировать

Book_Gidromet.indb 448 13.01.2010 13:16:01



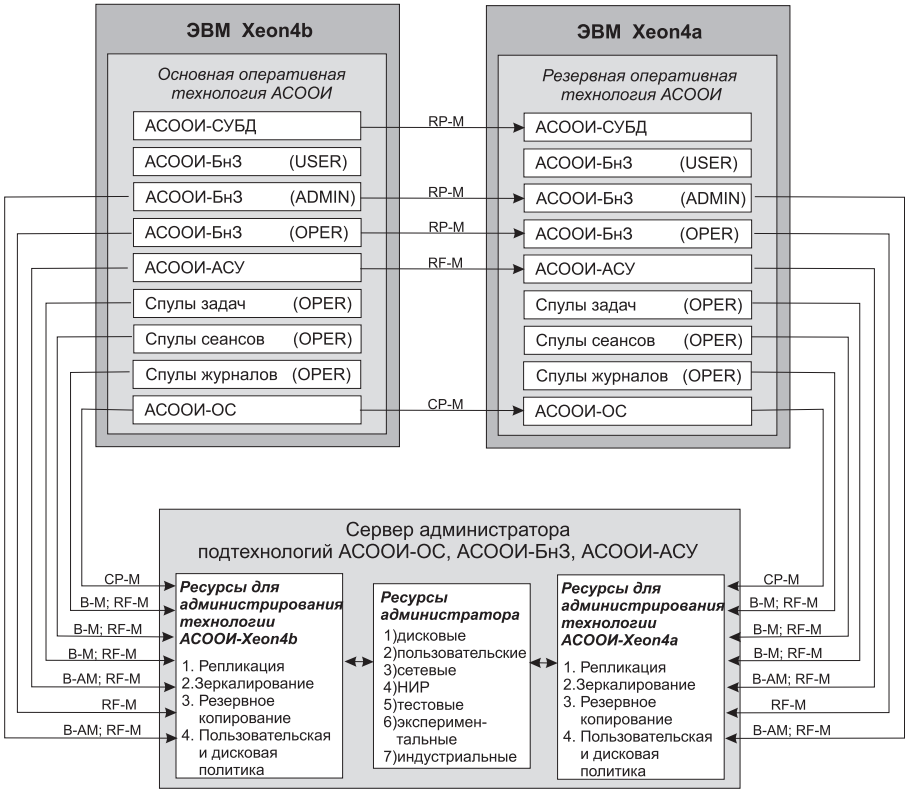
Примечания
1. Метки A1, A1.1, A2, A2.1, ..., A4.4 обозначают логические области (Areas) внутри дисковых ресурсов технологии АСООИ
2. Здесь не приведены непосредственные взаимодействия и взаимосвязи Банков Задач и баз данных (т.е.API АСООИ-СУБД)
3. Автоматическая Циклическая ротация и сжатие спулов задач осуществляется с 8-суточным (и более) циклом

© Гидрометцентр России, Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 12. Общая схема многоуровневой организации ресурсов и программного обеспечения ядра технологии АСООИ-Xeon4b.

Book_Gidromet.indb 449 13.01.2010 13:16:01

Book_Gidromet.indb 450



© ГУ "Гидрометцентр России", Отдел СИО, 2009 г.

Рис. 13. Общая схема поддержания/резервирования дисковых ресурсов многомашинной архитектуры технологий АСООИ Гидрометцентра России.

13.01.2010 13:16:02

новые и существующие сеансы обработки данных. Средства администрирования дают возможность администратору системы и операторам ЭВМ полностью контролировать весь вычислительный процесс, протекающий в рамках технологии АСООИ-Xeon4, а также оперативно осуществлять анализ нештатных ситуаций и восстановление отсутствующей информации. Средства расширенного администрирования позволяют осуществлять сетевую репликацию, зеркалирование и резервное копирование ресурсов АСООИ при условии наличия третьего, достаточно ресурсоемкого, сервера. Ядро этой технологии в общем виде характеризуется следующим образом.

Подтехнология АСООИ-СУБД реализует функции сервера баз данных (Database Server) для сетевой инфраструктуры Гидрометцентра России. Базы данных наблюдений, текстовой информации, полей глобального объективного анализа, прогностической продукции численных моделей, включенных в АСООИ-БнЗ, и зарубежных прогностических центров являются информационной основой функционирования рабочих мест специалистов-прогнозистов различных предметных областей, прогностических моделей, выполняющихся, в том числе, на других ЭВМ, пользователей-программистов, работающих на ПЭВМ в среде ОС Windows и ЭВМ в среде ОС Linux. Кроме того, базы данных Xeon4 являются центром сбора и размещения основных результатов всех оперативных и исследовательских прогностических моделей для их последующих централизованных оценок.

Подтехнология АСООИ-БнЗ реализует функции сервера приложений (Application Server), включающий в себя как оперативный Банк Задач, так и множество персональных банков задач и администраторский банк задач. Сервер представляет собой трехзвенную архитектуру *(персональные — администраторский — оперативный)*. Логическая структура соответствует предметным областям Гидрометцентра России, таким как Глобальный Объективный Анализ (ГОА), Глобальная Спектральная Модель Атмосферы (ГСМА), глобальная полулагранжева модель (ПЛАВ), региональная модель, мезомасштабная модель, ETA-модель, авиационные прогнозы, морские прогнозы, ансамблевые прогнозы, различные оценки прогнозов, среднедекадные и среднемесячные характеристики, специализированные прогнозы и др.

Подтехнологии АСООИ-АСУ и АСООИ-ОС реализует функции управляющего сервера (Control Server) с полным набором инструментальных средств, обеспечивающих как всестороннее развитие,

Book_Gidromet.indb 451 13.01.2010 13:16:03

администрирование, поддержание ресурсов технологии АСООИ-Xeon4, так и оперативную эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жабина И.И., Пурина И.Э., Степанов Ю.А., Чекулаева Т.С.* Новые оперативные технологии обработки гидрометеорологических данных и управления прикладными программами с использованием супер-ЭВМ CRAY // 70 лет Гидрометцентру России. СПб., 1999. С. 90—117
2. *Кастин О.М.* Банк гидрометеорологических данных «ПРОГНОЗ». Общее описание БнД «ПРОГНОЗ-1060» // М.: ГМЦ СССР, 1985. 43 с.
3. *Кастин О.М., Жабина И.И., Степанов Ю.А.* Банк гидрометеорологических данных «ПРОГНОЗ». Средства и организация работы с базами данных БнД «ПРОГНОЗ» // М.: ГМЦ СССР, 1985. 67 с.
4. *Пурина И.Э., Жабина И.И., Недачина А.Ю., Штырева Н.В.* Развитие информационных технологий в локальной сети CRAY // Труды Гидрометцентра России, М., 2000, вып. 334. С. 134—147.
5. *Фролов А.В.* Автоматизированная обработка оперативной метеорологической информации в ММЦ Москва с использованием супер-ЭВМ CRAY // Труды Гидрометцентра России, М., 2000, вып. 334. С. 3—18.

Book_Gidromet.indb 452 13.01.2010 13:16:03

Содержание

Гидрометцентр России в 21 веке 3
Р.М. Вильфанд, А.А. Васильев, Н.А. Шестакова

Разработка схемы трехмерного вариационного усвоения данных в Гидрометцентре России. 21
М.Д. Цырульников, П.И. Свиренко, В.Е. Горин, М.Е. Горбунов, Е.Г. Климова

Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России. 36
В.М. Лосев

Негидростатическая модель локального прогноза погоды Гидрометцентра России. 59
Д.Я. Прессман, Е.М. Пекелис, В.З. Кисельникова

Современные системы мезомасштабного прогноза погоды: состояние и перспективы 82
Г.С. Ривин

Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM 94
Н.Ф. Вельтищев, В.Д. Жупанов

Гидродинамический краткосрочный прогноз погоды в пунктах. 136
Л.В. Беркович, Ю.В. Ткачёва

Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России 147
А.А. Алексеева, В.М. Лосев, Б.Е. Песков, Е.В. Васильев, А.Е. Никифорова

Глобальная оперативная спектральная модель Гидрометцентра России: основные характеристики и особенности использования в технологиях кратко- и среднесрочного прогноза. 160
И.А. Розинкина, Ю.В. Алферов, Е.Д. Астахова, Т.Я. Пономарева, В.И. Цветков

Полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ 193
М.А. Толстых, Н.Н. Богословский, А.В. Шляева, А.Ю. Юрова

Book_Gidromet.indb 453 13.01.2010 13:16:03

Технологии динамико-статистических долгосрочных метеорологических прогнозов: современное состояние и перспективы 217
Д.Б. Киктев

Прогнозы погоды на месяц: состояние и перспективы 235
В.М. Хан, Р.М. Вильфанд, В.П. Садоков, В.А. Тищенко

Постпроцессинг модельных долгосрочных прогнозов в Северо-Евразийском климатическом центре 247
В.Н. Крыжов

Геодинамика и гидрометеорологические прогнозы. 254
Н.С. Сидоренков, К.А. Сумерова

Стандартизованная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов (SVSLRF). 264
А.В. Муравьев

Динамическая верификация численных моделей: анализ модельных механизмов генерации вертикальных движений и осадков. 289
Н.П. Шакина, Е.Н. Скриптунова, А.Р. Иванова, И.А. Горлач

Развитие методов прогноза погоды на основе статистической интерпретации гидродинамических моделей по технологии Гидрометцентра России. 313
Р.М. Вильфанд, П.П. Васильев, Е.Л. Васильева

Модель переноса примесей 336
И.В. Тросников

Развитие моделей и методов анализа данных наблюдений для мониторинга и прогнозирования крупномасштабных процессов в океане 350
Ю.Д. Реснянский, А.А. Зеленько

Развитие технологий морских гидрологических прогнозов. 376
З.К. Абузяров, И.О. Думанская, Е.С. Нестеров

Сезонные особенности термической структуры нижних слоев атмосферы в московском мегаполисе по данным микроволновых измерений температуры. 389
И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев

Book_Gidromet.indb 454 13.01.2010 13:16:04

Опасные паводки в бассейне р. Кубань и методы их прогнозирования 401
В.А. Бельчиков, С.В. Борщ, В.М. Мухин, А.Я. Полунин

Развитие информационного обеспечения Гидрометцентра России на базе технологического комплекса PROMETEI 423
И.Э. Пурина, И.И. Жабина, А.Ю. Недачина, Н.В. Дегтярева, И.В. Маковская

АСООИ-XEON4 — многомашинная оперативная автоматизированная технология ГУ «Гидрометцентр России», предназначенная для информационного обеспечения, регламентированного счета и формирования продукции различных прогностических моделей 435
Ю.А. Степанов, И.И. Жабина





Сборник научных трудов

80 ЛЕТ
ГИДРОМЕТЦЕНТРУ РОССИИ

Подписано в печать 12.01.10. Формат 136x200.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 29. Тираж 300 экз.
Заказ № 002

Типография «Триада, лтд»,
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33.