

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

№ 43

Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов

Под редакцией
канд. геогр. наук А.А. Алексеевой

2016

Информационный сборник № 43. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов / под ред. канд. геогр. наук А.А. Алексеевой. – М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2016. – 160 с.

Изложены результаты исследований по разработке новой технологии глобального циклического усвоения данных полей метеозаэlements, новой технологии выпуска глобальных численных прогнозов до десяти суток по гидродинамической модели атмосферы T339L31, глобальной системы ансамблевого среднесрочного прогноза, метода прогноза опасного природного явления – аномально холодной погоды в холодные (отопительные) периоды. Приведены результаты прогноза элементов погоды (срочных температур воздуха и суточных экстремумов температуры воздуха у Земли, скорости и направления приземного ветра, наличия и количества полусуточных сумм осадков) в пунктах Дальневосточного региона Российской Федерации по данным модели WF-ARW.

Обсуждаются данные агрометеорологических исследований по прогнозу урожайности ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по Омской области и разработки методов оценки условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя в Северо-Кавказском УГМС с заблаговременностью 1–2 месяца.

Представлены основные сведения о системе прогнозирования характеристик ветрового волнения для акватории Мирового океана, результаты точности прогноза высоты волн. Описаны основные характеристики новой технологии расчета и краткосрочного прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей.

Проанализированы результаты оперативных испытаний методов (технологий) и рекомендации по их внедрению.

Для научных работников в области синоптической метеорологии, гидродинамических, агрометеорологических и морских гидрологических прогнозов, специалистов службы прогноза погоды, аспирантов и студентов.

*М.Д. Цырульников, П.И. Свиренко, Д.Р. Гайфулин,
М.Е. Горбунов, А.Н. Багров*

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО УСВОЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ АНАЛИЗА 3D-VAR

В соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических прогнозов на 2015 г., в ФГБУ «Гидрометцентр России» в период с февраля 2014 г. по апрель 2015 г. проводились оперативные испытания новой технологии глобального циклического усвоения данных (ЦУД) метеорологических полей на основе схемы анализа 3D-Var с использованием прогностической полулагранжевой модели (ПЛАВ) [4] для формирования полей первого приближения.

Краткое описание технологии

Схема глобального циклического усвоения данных (ЦУД), основанная на вариационном анализе 3D-Var, полностью разработана в Гидрометцентре России. Используемая нами схема прогноза [4] разработана в Гидрометцентре России и Институте вычислительной математики РАН.

Схема анализа 3D-Var полностью разработана в Гидрометцентре России и основана на оригинальной и не имеющей прямых аналогов в мировой практике модели пространственных ковариаций на базе трехмерных фильтров авторегрессии и скользящего среднего [6]. Ковариации моделируются с помощью трехмерных фильтров в физическом пространстве, что позволяет задавать изменчивую в пространстве и времени структуру поля ошибок первого приближения в глобальной схеме и в дальнейшем использовать эту модель ковариаций в схеме гибридного вариационно-ансамблевого усвоения данных.

Анализируемые переменные:

а) в свободной атмосфере: геопотенциал, температура, компоненты ветра, относительная влажность;

б) приземные: приземное давление, давление на уровне моря, T2m, RH2m, UV10m.

Поля анализа формируются непосредственно на сетке модели. Поля инкрементов анализа вычисляются на регулярной широтно-долготной сетке с разрешением $1,5^\circ$ по горизонтали и 38 изобарических уровнях по вертикали от 1075 до 0,5 гПа.

В анализе по методу 3D-Var метеорологические данные усваиваются глобально, что обеспечивает гладкость полей анализа и возможность более эффективного усвоения нелокальных спутниковых наблюдений по сравнению с предыдущей оперативной схемой анализа [1, 2] на основе оптимальной интерполяции.

Схема глобального трехмерного вариационного анализа 3D-Var позволяет усваивать данные следующих видов метеорологических наблюдений:

– традиционные контактные наблюдения: приземные, радиозондовые, самолетные;

– спутниковые наблюдения: микроволновые с использованием прибора AMSU-A, радиозатменные наблюдения с использованием систем COSMIC и GRAS; скаттерометрические наблюдения с использованием системы ASCAT; ветровые по движению облаков и полям влажности с использованием систем AMV-Geo, AMV-Polar и AMV-LeoGeo.

В схеме ЦУД анализ 3D-Var работает, используя поля ПЛАВ в качестве первого приближения. Модель ПЛАВ, в свою очередь, стартует с полей анализа 3D-Var, вычисленных на предыдущем цикле усвоения. Цикл усвоения – 6 час.

Используется так называемая технология FGAT (первое приближение интерполируется на усваиваемые наблюдения не только в пространстве, но и во времени).

Схема объективного анализа унифицирована и используется также в оперативной схеме анализа с первым приближением NCEP (работает оперативно с 2012 г.). Кроме того, ядро предлагаемой схемы объективного анализа используется в настоящее время для усвоения

данных наблюдений о состоянии Мирового океана в Гидрометцентре России [3] (работает оперативно с 2006 года).

Испытанная технология ЦУД, в отличие от схем [1, 2, 5], не использует в качестве первого приближения основные поля зарубежных прогностических центров.

Пространственное разрешение формируемых полей анализа соответствует сетке модели ПЛАВ и составляет $0,9^\circ \times 0,7^\circ$ по горизонтали и 28 уровней по вертикали. Разрешение полей приращений анализа по отношению к прогнозу составляет $1,5^\circ$.

Новая схема глобального циклического усвоения данных функционирует в экспериментальном режиме на вычислительном сервере IBM Гидрометцентра России, включая оперативные сервера Ксеон-32 с 1 января 2013 г. Время счета основной программы усвоения данных составляет примерно четыре минуты. Анализы выпускаются четыре раза в сутки за сроки 0, 6, 12, 18 ч ВСВ с запаздыванием относительно сроков наблюдений не более 2 ч 44 мин. Счет прогнозов по модели ПЛАВ с использованием новой схемы циклического усвоения и запись прогностических полей в базы данных (БД LU3F) выполнялись с 1 марта 2014 года.

Методика испытаний

Оценка качества разработанной схемы циклического усвоения данных производилась по критерию качества численного прогноза погоды, стартовавшего с вычисленных с использованием данной схемы полей анализа. Прогностическая модель – ПЛАВ. Заблаговременность – 1–3 сут.

Оценивались поля H , T , V (уровни 850, 500, 250), P_0 , T_2m . Критерии качества прогноза – среднее и среднеквадратичное отклонение (RMS) от полей оперативных анализов или данных стационарных наблюдений. Сравнение – как с полями анализа (Северное полушарие), так и с данными синоптических и аэрологических станций (Европа, Азия).

Результаты испытаний

Период оценки – с февраля 2014 по апрель 2015 года. Испытания проводились следующим образом. Оценка делалась для регионов Европа, Азия и Северное полушарие как по полям объективного

анализа (ОА), так и по станциям. Привлекались прошедшие контроль наблюдения синоптических и аэрологических станций. В качестве схемы анализа взяты поля оперативного глобального анализа с шагом $0,5^\circ$ по широте и долготе [5]. Оценка проводилась по сетке $1,5^\circ$ по широте и долготе. Сравнивались прогнозы на трое суток, рассчитанные по модели ПЛАВ-2008 от исходных полей СУД (3DV_сус_ПЛАВ) с оперативными прогнозами по той же модели (ПЛАВ), стартующей с оперативного объективного анализа (где в качестве полей первого приближения используются американские прогнозы на шесть часов NCEP). Исходный срок – 00 ч ВСВ. Дополнительно в сравнении участвовали глобальные модели американского (NCEP), английского (UKMO), немецкого (DWD) и японского (JAPAN) метеоцентров, а также спектральная модель T339L31. Результаты оценки по полям ОА для внетропической части Северного полушария представлены на рис. 1–4. Примерно такое же соотношение успешности всех участвующих моделей оказалось и при оценке по станциям (поэтому они здесь не приводятся).

Результаты сравнения позволяют сделать следующие основные выводы:

– уровень точности прогнозов при использовании новой системы усвоения оказался существенно ниже уровня точности прогнозов зарубежных центров;

– уровень точности прогнозов при использовании новой системы усвоения также ниже уровня точности прогнозов ПЛАВ при использовании оперативного объективного анализа. Например, RMS для H500 в Европе (оценка по станциям) при прогнозе на 1–3 суток за весь период испытаний равны 1,72, 2,59, 3,73 дам, оперативных прогнозов ПЛАВ – 1,47, 2,15 и 3,15 дам, а модели T339L31 – 1,81, 2,48 и 3,72 дам;

– в целом качество прогнозов по данной схеме оказалось несколько выше качества прогнозов по спектральной модели T339L31, использовавшей анализы на основе первого приближения NCEP.

Необходимо отметить, что, как показали испытания, уровень точности прогнозов при использовании новой системы усвоения заметно ниже уровня точности прогнозов при использовании оперативного объективного анализа. Однако принципиальным преимуществом

График изменения среднеквадратической ошибки прогноза P_0 (гПа) в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие (Оценка по сетке $1,5^\circ \times 1,5^\circ$)

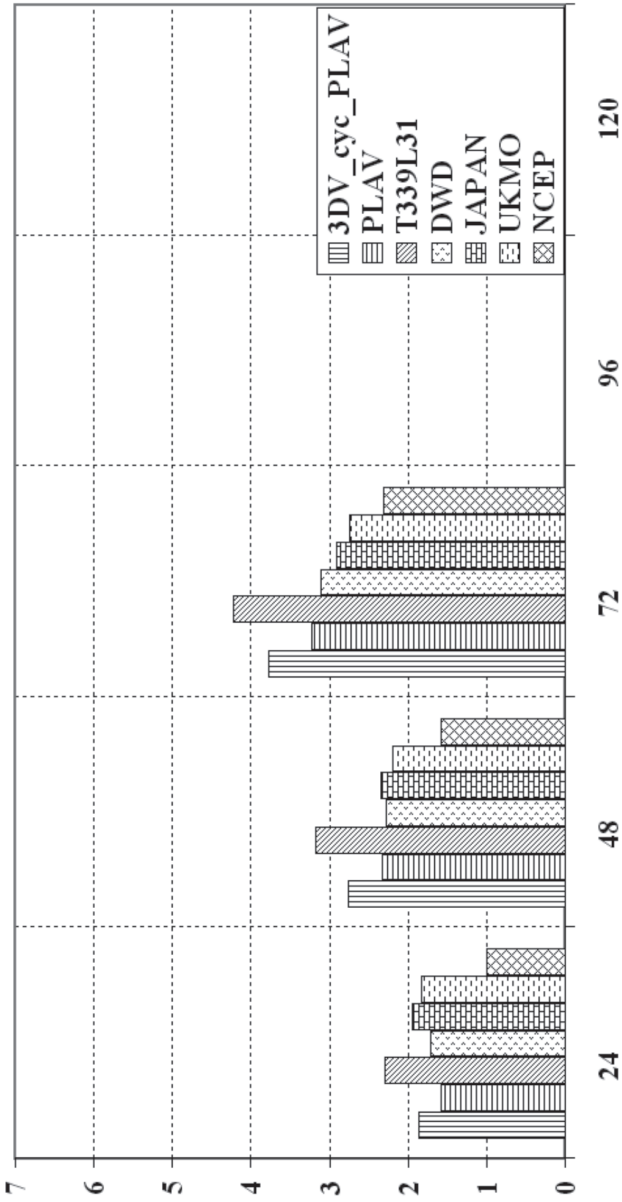


Рис. 1. Среднеквадратичные ошибки трехсуточных прогнозов давления на уровне моря.

График изменения среднеквадратической ошибки прогноза Н-500 (дам)
 в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие
 (Оценка по сетке 1,5 x 1,5°)

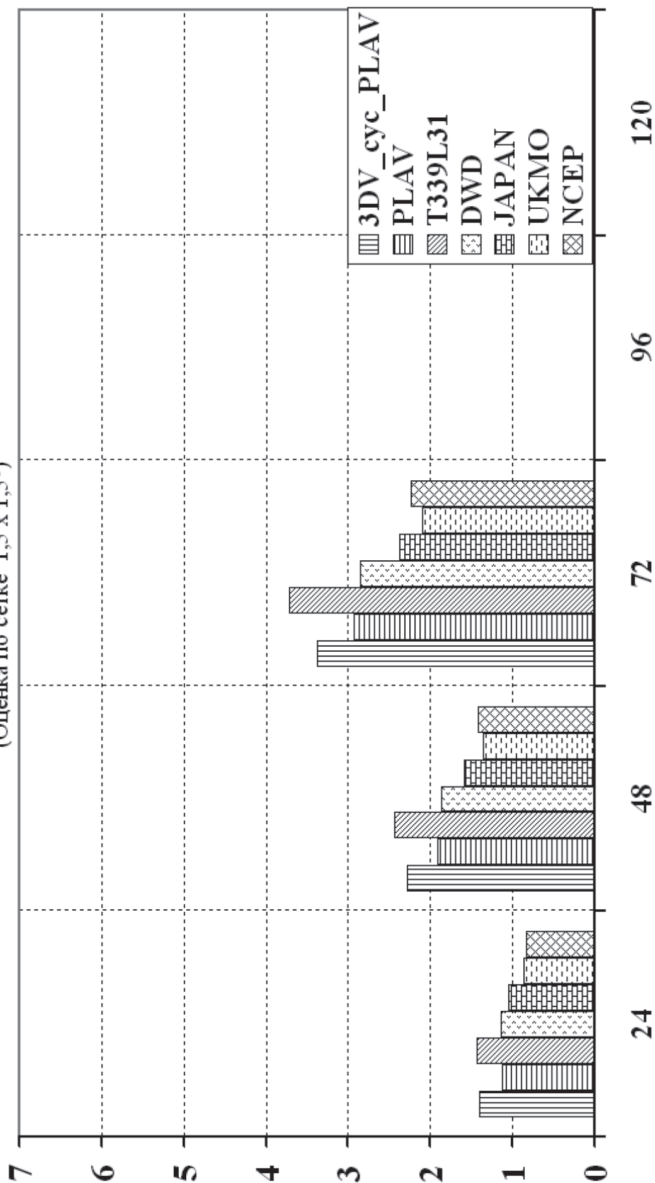


Рис. 2. Среднеквадратичные ошибки трехсуточных прогнозов геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа.

График изменения градиентной ошибки (S1) прогноза H-500
 в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие
 (Оценка по сетке 1,5° x 1,5°)

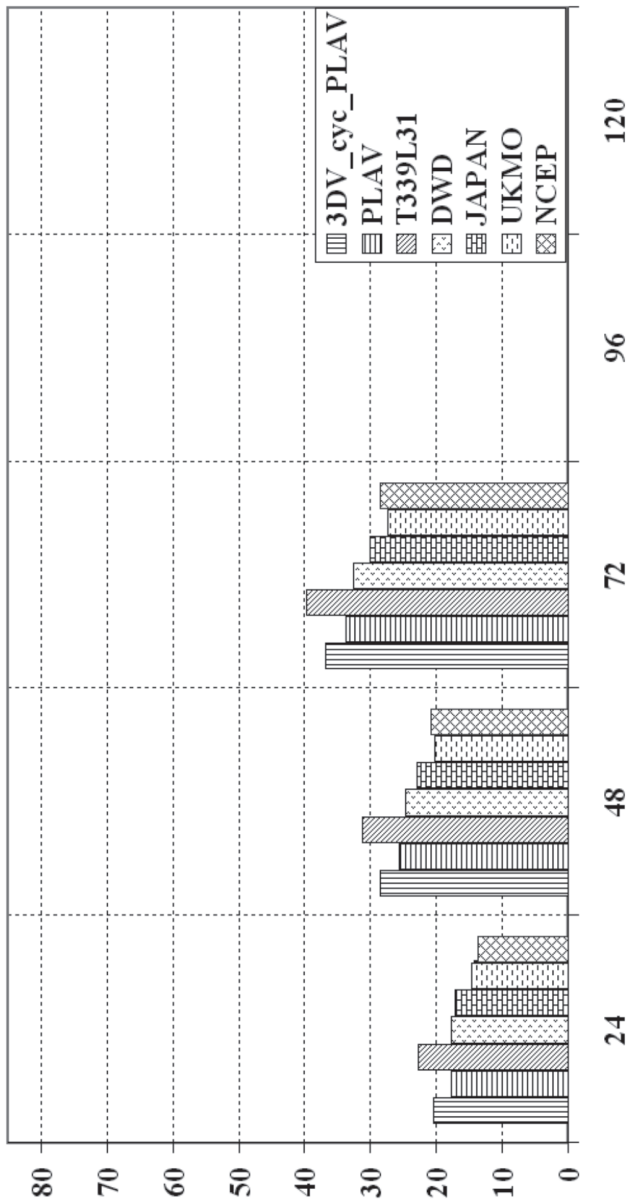


Рис. 3. Градиентные ошибки трехсуточных прогнозов геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа.

График изменения среднеквадратической ошибки прогноза T-850 (°C)
 в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие
 (Оценка по сетке 1,5 x 1,5°)

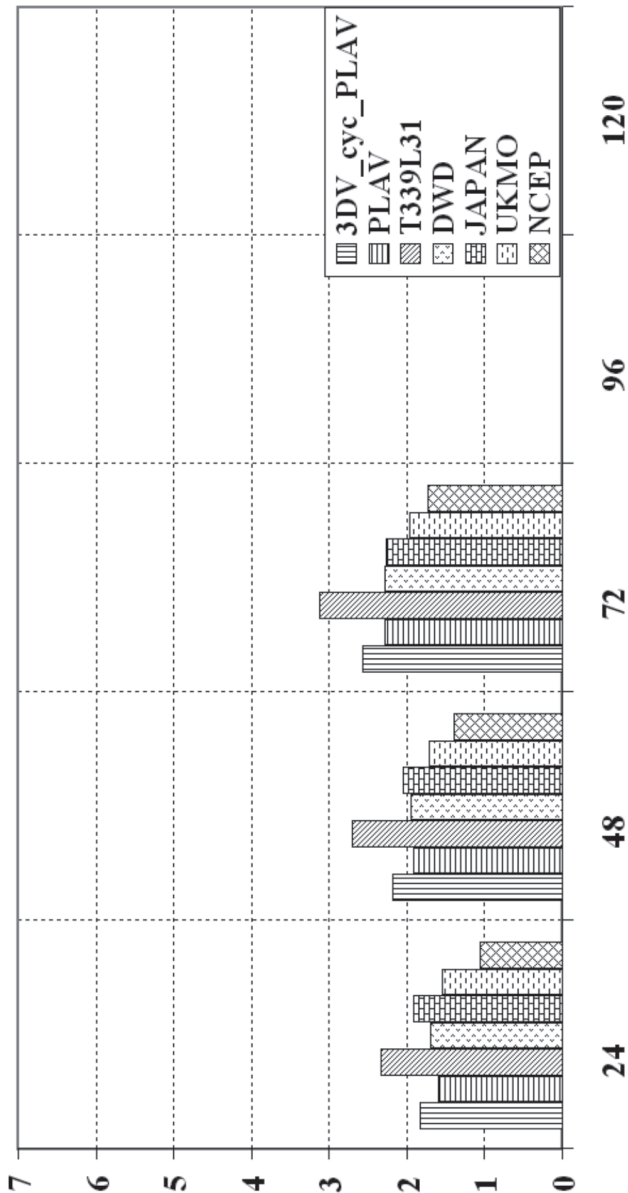


Рис. 4. Среднеквадратичные ошибки трехсуточных прогнозов температуры на поверхности 850 гПа.

разработанной системы является ее независимость от оперативных прогнозов зарубежных метеоцентров, что делает целесообразным использование разработанной технологии в качестве резервной. Кроме того, качество прогнозов по данной схеме оказалось выше качества прогнозов по спектральной модели, использовавшей анализы на основе первого приближения NCEP.

О надежности счета новой схемы анализа

Система показала высокую степень надежности и живучести. Так, не было ни одного случая аварийного завершения анализа, а также система достаточно устойчиво переносила периоды отсутствия некоторых видов наблюдений.

Рекомендации к внедрению

ЦМКП Росгидромета в своем решении от 24.06.2015 г. рекомендовала новую схему глобального циклического усвоения данных на основе разработанной схемы 3D-VAR с моделью ПЛАВ к внедрению в оперативную эксплуатацию в ФБГУ «ГВЦ Росгидромета», ФБГУ «Гидрометцентр России» в качестве резервной технологии на случай прекращения оперативного поступления полей прогнозов зарубежных центров.

Заключение

Развитие системы ЦУД производится в настоящее время в сторону введения в нее ансамблевых компонентов. Создана система ансамблевых анализов и прогнозов. Разрабатывается система гибридного вариационно-ансамблевого усвоения данных. Создаваемые системы основаны на наших собственных исследованиях и разработках.

Список литературы

1. *Багров А.Н., Цырульников М.Д.* Оперативная схема циклического усвоения данных Гидрометцентра России // 70 лет Гидрометцентру России. – СПб.: Гидрометеиздат, 1999. – С. 59–69.
2. *Багров А.Н., Локтионова Е.А., Цырульников М.Д.* Развитие оперативного циклического усвоения данных в Гидрометцентре России // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 335. – С. 19–30.

3. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Свиренко П.И. Глобальная система усвоения океанографических данных: пилотная версия // Современное состояние и проблемы навигации и океанографии: труды 6-й Российской научно-технической конференции. СПб., 23–25 мая 2007 г. – С. 464–472.

4. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. – М.; Обнинск: ОАО ФОРС, 2010. – 111 с.

5. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Горин В.Е., Горбунов М.Е., Ордин А.Л., Багров А.Н. Новая технология объективного анализа на основе схемы 3D-VAR // Информационный сборник № 39. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2012. – С. 6–14.

6. Tsyruльников M.D., Svireno P.I. A covariance model based on 3-D spatial filters: potential for flow-dependent covariance modelling // Res. Act. Atm. Ocean. Model. – WMO, 2007. – Rep. No. 35. – P. 1.39–1.40.

*И.А. Розинкина, А.Н. Багров, Е.Д. Астахова, В.И. Цветков,
Т.Я. Пономарева, А.Ю. Михайлов, Ю.В. Алферов, А.Е. Никитин,
М.В. Шатунова, Д.В. Васькова, В.В. Копейкин*

ГЛОБАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ ДО 10 СУТОК НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ Т339L31 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Новая версия глобальной спектральной модели атмосферы Т339L31 с шагами гауссовой сетки приблизительно $0,35^\circ$ (шаг по меридиану около 35 км и по параллели около 35 км на экваторе и 20 км в умеренных широтах) была разработана, протестирована и апробирована в ФГБУ «Гидрометцентр России» в период 2011–2014 гг. в рамках тем НИОКР Росгидромета. Эта версия модели работала в режиме оперативных испытаний в период с декабря 2013 г. по август 2014 г. включительно.

В качестве основных изменений, выполненных при разработке новой версии технологии с ядром Т339L31, предназначенной для замены внедренной предыдущей версии Т169L31 (шаг гауссовой сетки около $0,71^\circ$) [2], можно выделить следующие:

– повышено горизонтальное разрешение модели атмосферы, при этом подобраны параметры горизонтальной вычислительной диффузии для устойчивого счета модели (169 \rightarrow 339 сферических гармоник, шаг гауссовой сетки: $0,72^\circ \rightarrow 0,36^\circ$);

– отобраны и использованы новые архивы внешних параметров подстилающей поверхности, алгоритмы построения полей рельефа, альбедо и «маски» суша – море.

– используемые климатические значения температуры нижних слоев почвы были заменены на значения, вычисляемые в препроцессинге

как функции предшествующих наблюдений приземной температуры воздуха за период в несколько дней;

- введена модификация блока подстилающей поверхности в части параметризации теплопроводности и задания толщин слоев и инициализации температуры нижнего слоя почвы;

- введены оптимизирующие процедуры в коды модели, пре- и постпроцессинга;

- обеспечено устойчивое функционирование новой цепочки задач на многопроцессорной технике (обеспечен режим распараллеливания по 32 процессам).

Наиболее важным при отладке новой версии модели было следующее:

- возможность использования ограниченного интервала времени для вычислений готовых прогнозов к строго заданному моменту. Следуя опыту и требованиям дальнейшего оперативного распространения результатов численных прогнозов, астрономическое время ЭВМ, затрачиваемое на расчет одних суток модельного прогноза, ограничивается 25 минутами астрономического времени на имеющейся в распоряжении ММЦ «Москва» суперкомпьютерной технике;

- новые положения Наставления по Глобальной системе обработки данных наблюдений и прогнозирования (ГСОДП) в рамках Программы Всемирной службы погоды ВМО о масштабах явлений, разрешаемых глобальными моделями глобальных центров ВМО (одним из которых является ММЦ «Москва»), как минимум альфа-мезомасштаба (ориентировочно 2000–200 км), требующего разрешения сетки моделей не грубее 50 км.

Требование экономичности вычислений по разрабатываемой новой версии модели атмосферы имело дополнительный аспект – требовалось предусмотреть последующую возможность включения данной версии в систему оперативного среднесрочного ансамблевого прогнозирования ММЦ «Москва», построенную на многократных (минимум 15) «прогонах» модели по немного отличающимся начальным данным для получения результатов, также к строго заданному времени. Учитывая ограниченность компьютерных ресурсов, в данных условиях это может быть достигнуто только при использовании сравнительно небольшого (менее 50) количества процессоров вычислительной техники.

Модель T339L31 во время испытаний считалась на 32 процессорах суперкомпьютера SGI ALTIX, время счета с полным циклом обработки составляло приблизительно 30 мин для одних суток прогноза. После остановки ЭВМ SGI ALTIX в сентябре 2014 г. полная версия технологии по T339L31 была перенесена на ЭВМ TORNADO, время счета в исследовательском режиме одних модельных суток на 16 процессорах составило 20 мин, что полностью удовлетворяет требованиям оперативного прогноза и свидетельствует об экономичности предлагаемого модуля.

Для проведения оперативных испытаний в качестве важнейшего этапа, предшествующего работе модели в оперативном режиме, разработчиками была организована полная технологическая цепочка с оперативным сопровождением, системой необходимых баз данных, содержащих исходные данные оперативного объективного анализа и результаты прогнозов на различных координатных сетках, отличающейся номенклатуры. Основные сведения об информационно-технологических характеристиках участвующих в испытаниях технологических цепочек выпуска глобальных численных прогнозов на базе T169L31 и T339L31 приведены в табл. 1.

Испытывались прогнозы по T339L31, выпускаемые по начальным данным объективного анализа Гидрометцентра России (ОА) (метод оптимальной интерполяции) на сетке $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ за период декабрь 2013 г. – август 2014 г., в течение которого модель не подвергалась изменениям. В то же время, в силу частичного на указанный период перевода технологий Гидрометцентра России (в соответствии с рекомендацией ЦМКП) на новый ОА Гидрометцентра России (3D-Var), оценки прогнозов в рамках единой системы оценок Гидрометцентра России (официальных испытаний) рассчитывались по результатам нового 3D-Var ОА Гидрометцентра России после дополнительной интерполяции результатов прогнозов на сетку $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Прогнозы осадков и приземной температуры были оценены для европейской части России по данным измерений в пунктах на основе сравнения измерений в этих пунктах с проинтерполированными из узлов сетки $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ расчетными значениями.

Авторские оценки успешности прогнозов, необходимые для получения детальной информации для дальнейшего усовершенствования

Таблица 1

**Сведения об информационно-технологических характеристиках участвующих
в испытаниях технологических цепочек выпуска глобальных численных
прогнозов на базе T169L31 и T339L31**

Версии спектральной модели атмосферы	T169L31	T339L31	
ЭВМ	ALTIX	ALTIX	TORNADO
Размерность вычислительной гауссовой сетки (точек вдоль широт – долгот)	1024×512	2048×1024	
Шаг сетки	~ 0,72°×0,72°	~ 0,36°×0,36°	
Режим счета	оперативный	псевдо-оперативный	исследовательский
Число процессоров	32	32	16
Счет по исходным данным	00, 12 ч ВСВ	00, 12 ч ВСВ	
Время счета за срок 00 ч ВСВ (прогноз до 84 ч)	15 мин	1 ч 40 мин	1 ч 10 мин
Время счета за срок 12 ч ВСВ (прогноз до 240 ч)	35 мин	4 ч 20 мин	3 ч 10 мин
База исходных данных	S125 (объективный анализ Гидрометцентра России, сетка 1,25°×1,25°)		
Базы результатов счета на сетке 2,5°×2,5°	SELN_	SLF	
Базы результатов счета на сетке 1,25°×1,25°	SEL2	SEL3	
База результатов счета на вычислительной сетке	MRFN ~ 0,72°×0,72°	MRF3 ~ 0,36°×0,36°	
База оценок и полей геопотенциала и давления без коррекции на сетке 1,25°×1,25°	RAW2	_RWF	

модели атмосферы, вычислялись путем сравнения результатов расчетов с результатами того же ОА, с которого происходил старт модели. Дело в том, что новый 3D-Var ОА Гидрометцентра России к моменту начала испытаний находился в постоянном усовершенствовании, что могло затруднить интерпретацию изменений успешности моделирования, если бы он был использован в качестве начальных полей

(качество прогнозов сильно зависит от качества анализа) либо в качестве тестового поля во время испытаний. Поэтому обе модели стартовали с полей ОА, алгоритмы которого заведомо не изменялись, и сравнивались с этими же полями.

В принципе, различия тестовых ОА для авторских оценок и результатов оперативных испытаний не имеют принципиального значения для выводов об успешности работающей и новой версии модели атмосферы, стартовавших с одного и того же ОА. Однако при сравнении технологий численного прогноза, стартовых с другого ОА (например, другой системы глобального прогноза на основе модели ПЛАВ), это неизбежно приводит к снижению достоверности выводов об их сравнительной успешности.

Логическая схема информационного обеспечения оперативных испытаний показана на рис. 1.

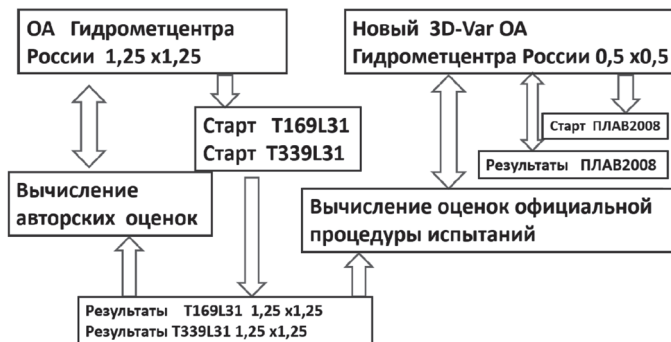


Рис. 1. Схема организации вычисления оценок успешности прогнозов в рамках оперативных испытаний новой версии модели T339L31.

Испытания заключались в вычислении ежедневных оценок — критериев качества модельных прогнозов, рекомендованных ВМО, и в режиме авторских оценок по ОА за сроки 00 и 12 ч ВСВ для базовых метеорологических полей (H500, P₀, U250) с последующим помесечным осреднением (наиболее информативные из которых: коэффициенты корреляции аномалий, среднеквадратическое отклонение, средняя ошибка, градиентная ошибка прогнозов; для полей ветра — модуль векторной разности) для внетропической зоны Северного полушария и для региона Европа. Дополнительно в режиме авторских оценок были

вычислены и проанализированы критерии качества для всех стандартных изобарических поверхностей для внетропических зон Северного и Южного полушарий, Европы, Азии, Тихого и Атлантического океанов, а также был выполнен анализ ряда случаев прогноза развития явлений альфа-мезомасштаба по двум версиям модели атмосферы.

По результатам анализа оценок успешности прогнозов за указанный период выявлено, что прогнозы базовых метеорологических полей ($H500$, P_0 , $U250$), полученные по версии T339L31, несколько превышают большинство показателей успешности прогнозов соответствующих полей версии модели T169L31, как для отдельных регионов, так и для Северного полушария в целом, и не уступают по качеству модели T169L31 для Южного полушария. Некоторое снижение качества (на 0,5 %) по корреляционным критериям наблюдалось в версии модели T339L31 в прогнозах высоты геопотенциальных поверхностей на самых верхних уровнях атмосферы (10 и 20 гПа).

Прогнозы осадков, как правило, оказывались лучше по версии модели T339L31.

Следует отметить, что новая версия глобальной модели атмосферы имеет разрешение вычислительной сетки около 35 км и спектральное усечение по 339 сферическим гармоникам. Это означает, что впервые в отечественной практике глобального моделирования была обеспечена возможность явного описания отдельных мезомасштабных атмосферных циркуляций диаметром 100–200 км в гидростатическом приближении, в класс которых попадают небольшие по размерам циклонические вихри, такие как тропические или арктические мезоциклоны, представляющие особую важность для прогнозирования экстремальных погодных явлений.

Качественный анализ прогнозов синоптической структуры метеополей выявил более высокую подробность отображения в прогнозах моделью T339L31 таких метеорологических величин, как вертикальные скорости, приводной/приземный ветер, осадки и облачность, распределение приземной температуры в горных областях. В ходе испытаний был рассмотрен целый ряд случаев прогнозирования этих структур. Также была выявлена более высокая реалистичность прогнозируемого новой версией модели атмосферы развития циркуляционных структур небольших пространственных масштабов, в первую

очередь тропических и арктических циклонов. Так, на рис. 2 показано сравнение прогнозов по обеим версиям спектральной модели атмосферы случая быстроразвивающегося арктического циклона (в полях анализа этой структуры еще не было, анализировались прогнозы на 36 часов).

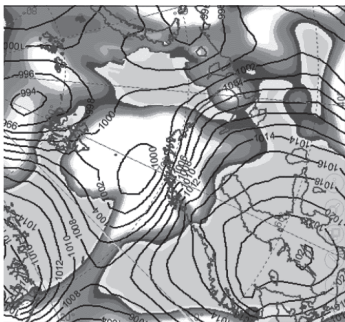
Как видно, модель с большим по горизонтали разрешением в сравнении с моделью T169L31 «сформировала» более близкие к реальности поле давления и зону штормовых ветров в Баренцевом море и на его побережии (в районе Мурманска по T339L31 и в поле ОА – около 13 м/с, а по T169L31 – всего 9 м/с).

На рис. 3 рассматривается другой аналогичный случай – прогнозирование тропических циклонов (прогнозы на 24 ч). Видно, что один из циклонов в районе Японских островов в прогнозе по T339L31 имеет давление в центре 979 гПа, в поле ОА – 978 гПа, а в прогнозе по T169L31 – 983 гПа. Циклон в прогнозе T339L31 более локализован, и это лучше соответствует ОА, чем в прогнозе T169L31. Однако отметим, что это лишь небольшие уточнения уже «живущего» в прогностическом времени циклона. Более интересен для рассмотрения факт появления в модельном времени нового глубокого образования в центральной части Тихого океана (правые нижние части рисунков), что в прогнозе по T339L31 гораздо ближе к реальности, чем в случае прогноза T169L31. Рассмотренный случай оказался достаточно типичным при сравнении результатов моделирования в тропической зоне рассматриваемыми версиями глобальной модели атмосферы.

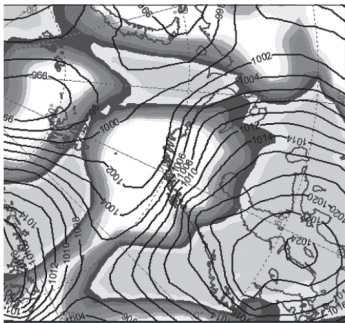
Рассмотренные факты нашли свое отражение в констатирующей части решения ЦМКП: «Ряд рассмотренных прогнозов полей давления при прохождении зарождающихся тропических циклонов и арктических мезоциклонов также свидетельствует о более близком к реальности моделировании процессов по T339L31».

Оперативные испытания прогностических полей модели T339L31 наряду с другими моделями проводились в период с 1 декабря 2013 г. по 31 августа 2014 г. Проверка осуществлялась по полям нового глобального ОА Гидрометцентра России (3D-Var) [4] с шагом по горизонтали $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. По рекомендации ВМО проверка велась по узлам сетки $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ по следующим пяти территориям: Европе, Азии, внетропическим частям Северного и Южного полушарий и тропической зоне.

T339L31



T169L31



OA

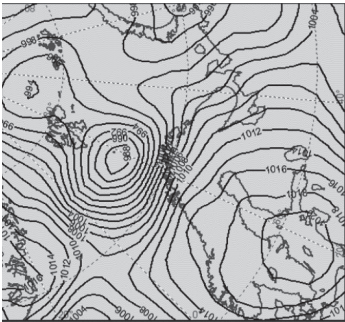


Рис. 2. Пример прогноза P_0 и облачности (верхний ряд рисунков) и $|U_{10}|$ (нижний ряд рисунков) арктических циклонов 4 апреля 2014 г. (заблаговременность 36 ч) в сравнении с данным OA (шаг $1,25^\circ \times 1,25^\circ$).

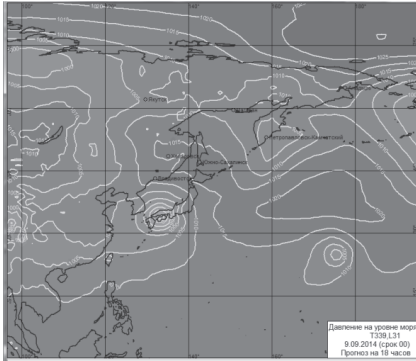
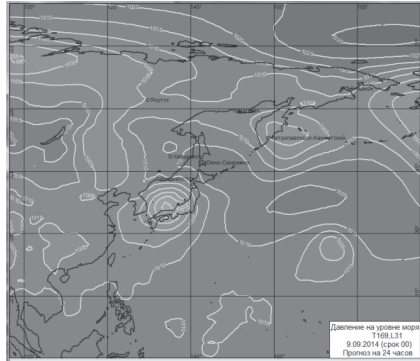
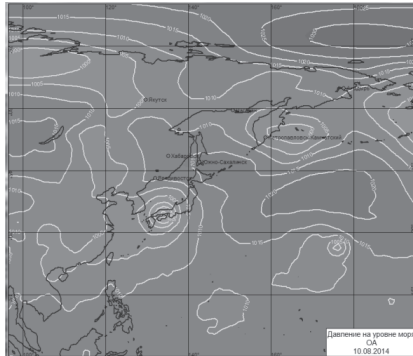
T339L31**T169L31****ОА**

Рис. 3. Пример прогноза тропических циклонов 10 августа 2014 г. в сравнении с данными ОА (шаг $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$).

Рассчитывались отклонения прогностических полей геопотенциала (давления на уровне моря), температуры и ветра у поверхности Земли, а также на уровнях 850, 500 и 250 гПа от аналогичных полей ОА. Для сравнения в проверке также участвовали глобальные модели: спектральная T169L31, полулагранжева ПЛАВ [3] и зарубежные модели UKMO (Великобритания), NCEP (США) и ECMWF (Европейский центр по среднесрочным прогнозам). Отметим, что по технологическим особенностям оценки прогнозов с заблаговременностью 24–72 ч относятся к исходному сроку прогнозов 00 ч ВСВ, а с заблаговременностью 96–240 ч – к исходному сроку 12 ч ВСВ.

Как видно из рис. 4–8, в большинстве случаев и по большинству заблаговременностей прогноза модель Т339L31 имеет некоторое преимущество перед моделью Т169L31. В то же время имеется заметное отставание от показателей качества лучших мировых метеоцентров, а также от модели ПЛАВ. Оценки прогнозов приземной температуры воздуха не выявили преимущества модели Т339L31 по сравнению с моделью Т169L31.

Приведем также результаты прогноза количества осадков за тот же период. Проверка проводилась по Европейской территории России (45–65° с. ш., 27–57° в. д.). На этой территории расположены ~680 синоптических станций, которые проводят измерения количества выпавших осадков в 06 и 18 ч ВСВ за 12-часовые интервалы времени. За факт осадков принимаются любые осадки, в том числе и менее 0,1 мм / 12 ч (так называемые «следы осадков»).

В табл. 2–5 представлены результаты прогнозов осадков. Кроме упоминавшихся моделей, в испытаниях по прогнозу осадков участвовали: модель JAPAN (Япония); Region (региональная модель Гидрометцентра России); COSMO-Ru7 и COSMO-Ru13 – мезомодели, прогнозы по которым рассчитываются в Гидрометцентре России, с шагом сетки ~7 и 13 км; aUNC – комплексный прогноз осадков на основе моделей UKMO, NCEP и COSMO-Ru7, рассчитанный с применением статистических методов.

Обозначения в табл. 2–5: U – общая оправдываемость прогноза осадков (в %) в соответствии с Наставлением ([1], табл. 8, 9 в зависимости от фазы наблюдаемых осадков). Для пояснения остальных обозначений приведем таблицу сопряженности:

Прогноз	Фактическое количество случаев		Сумма
	с осадками	без осадков	
с осадками	k11	k12	k10
без осадков	k21	k22	k20
Сумма	k01	k02	k00

Критерий $ETS = (k11 - a) / (k11 - a + k12 + k21)$,
 где $a = (k11 + k12) \times (k11 + k21) / k00$.

Критерий Пирси–Обухова $PIR = k11/k01 - k12/k02$.

График изменения среднеквадратической ошибки прогноза P_0 в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие.
(Оценка по сетке 1.5 x 1.5°)

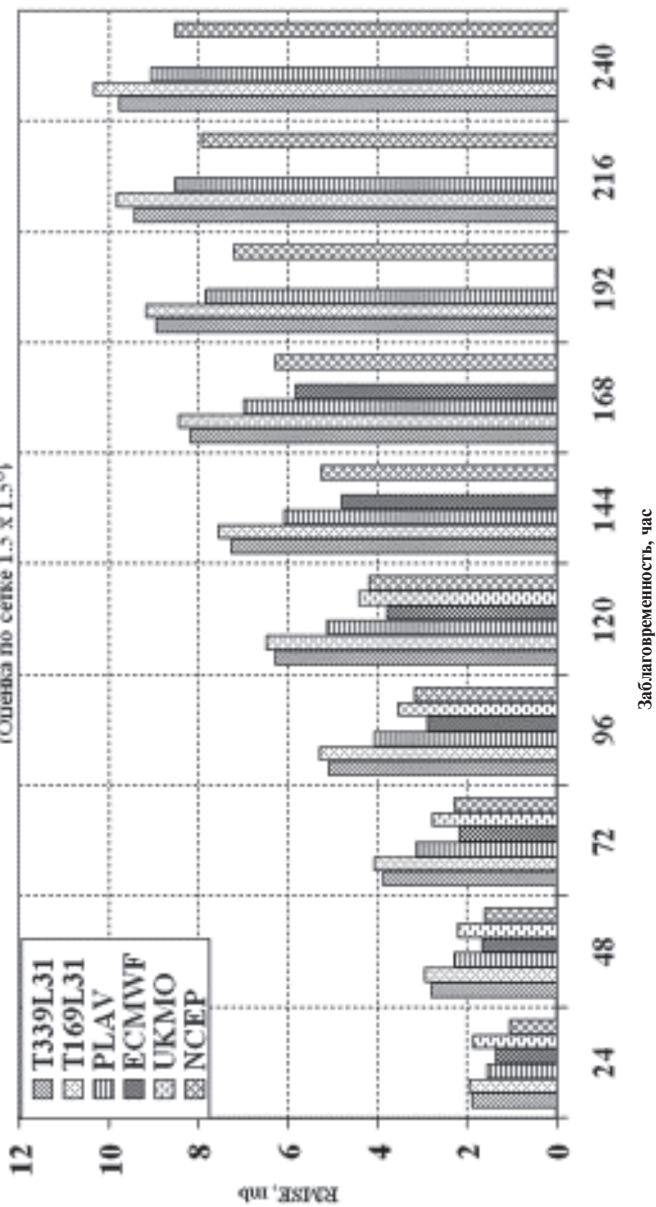


Рис. 4. Среднеквадратичные ошибки прогнозов давления на уровне моря.

График изменения среднеквадратической ошибки прогноза H-500
в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие.
(Оценка по сетке 1,5 x 1,5°)

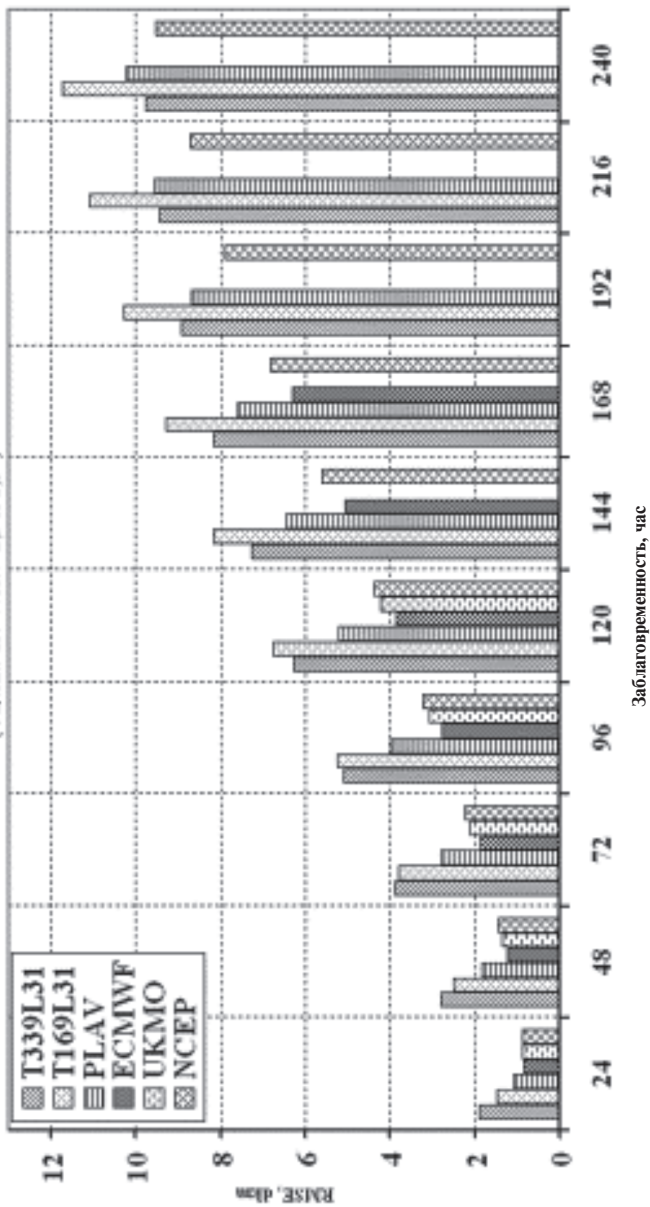


Рис. 5. Среднеквадратичные ошибки геопотенциальной высоты поверхности 500 ГПа.

График изменения градиентной ошибки (SI) прогноза H-500
 в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие.
 (Оценка по сетке 1.5 x 1.5°)

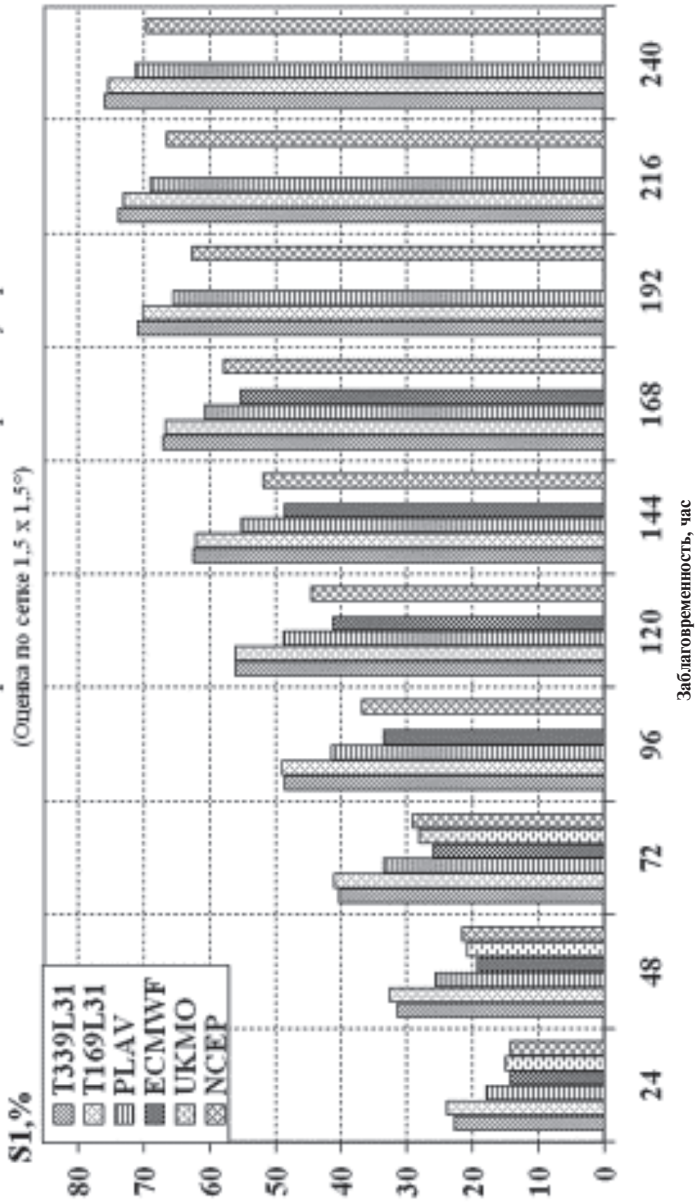


Рис. 6. Градиентные ошибки прогнозов геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа.

График изменения среднеквадратической ошибки прогноза T-850
в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие.
(Оценка по сетке 1,5 x 1,5°)

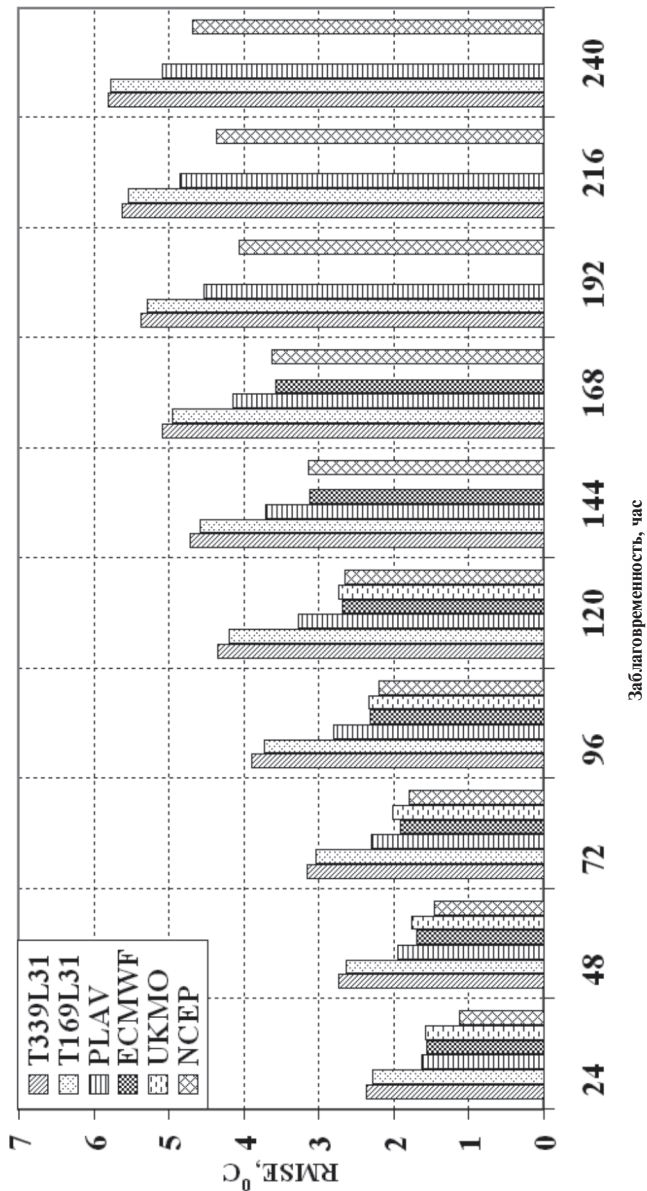


Рис. 7. Среднеквадратичные ошибки прогнозов температуры на поверхности 850 гПа.

График изменения среднеквадратической векторной ошибки прогноза V_{с250} в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие. (Оценка по сетке 1,5 x 1,5°)

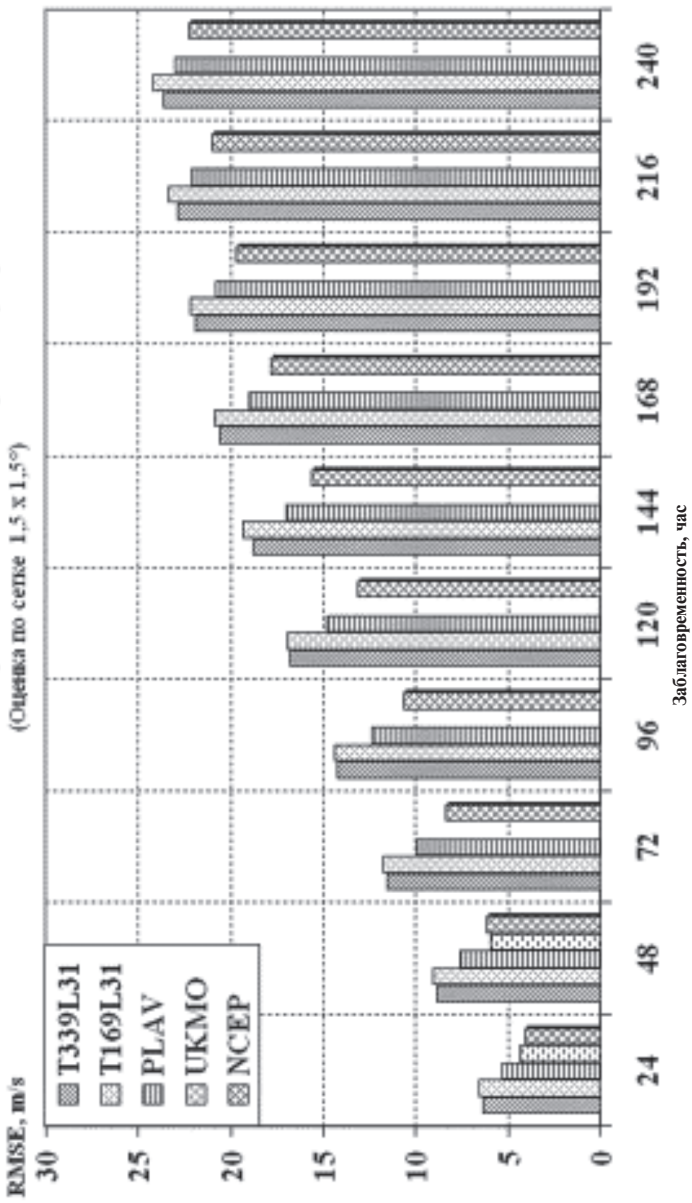


Рис. 8. Среднеквадратичные векторные ошибки прогнозов ветра на поверхности 250 гПа.

BIAS и ABS – средняя (систематическая) и средняя абсолютная ошибка прогноза осадков в мм/12ч; NN – общее число случаев (станций).

Чем ближе к 1 критерию PIR и ETS, тем точнее прогноз факта осадков. В период испытаний около 36 % наблюдений были с осадками и около 64 % без осадков.

Как видно из табл. 2–5, оправдываемости прогнозов осадков для Европейской части России, выбранной в качестве тестового полигона, по моделям T339L31 и T169L31 весьма близки, но критерии ETS и PIR у модели T339L31 несколько лучше.

По отношению к успешности прогнозов крупномасштабных базовых полей по модели среднесрочного прогноза Гидрометцентра России и ИВМ РАН ПЛАВ-2008, успешность прогнозов крупномасштабных полей T339L31 по-прежнему несколько уступает соответствующим прогнозам по ПЛАВ-2008, при примерно одинаковой успешности прогнозов осадков, и поочередно уступает – превышает успешность прогноза приземной температуры в зависимости от времени суток. Следует отметить, что в период испытаний ПЛАВ-2008 стартовала с полей того же анализа, с которым проводилось сравнение, а T169L31 и T339L31 – с прежней версии анализа Гидрометцентра России, что привело к некоторому ухудшению демонстрируемых сравнительных результатов.

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП), рассмотрев результаты испытаний прогнозов базовых метеополей по Северному и Южному полушариям на основе глобальной спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России T339L31, 24.10.2014 г. постановила ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУ «ГВЦ Росгидромета» внедрить модель T339L31 в оперативную технологию среднесрочного глобального прогноза высотных и приземных полей взамен модели T169L31».

ЦМКП отмечена экономичность вычислительного модуля модели T339L31, а также соответствие параметров пространственного разрешения модели T339L31 мировому уровню технологий глобального численного прогноза и важность внедрения данной модели для обеспечения выполнения функций ММЦ «Москва».

Таблица 2

**Результаты оценки прогноза дневных осадков по ЕТР (~680 станций)
за период с 1.12.2013 по 31.08.2014 г. с заблаговременностью 18 ч**

Модель	NN	U	ETS	PIR	BIAS	ABS
UKMO	176552	78	0,30	0,54	0,57	1,05
NCEP	182917	83	0,37	0,58	0,07	0,76
JAPAN	182286	82	0,34	0,51	-0,07	0,83
T169L31	181651	82	0,29	0,42	0,08	0,96
T339L31	176994	83	0,32	0,46	0,15	0,95
PLAV	181655	83	0,35	0,53	-0,09	0,71
Region	180262	82	0,25	0,37	-0,25	0,76
COSMO7	177619	84	0,39	0,58	-0,15	0,72
COSMO13	173024	83	0,37	0,57	-0,01	0,79
aUNC	182917	86	0,43	0,58	0,05	0,76

Таблица 3

**Результаты оценки прогноза дневных осадков по ЕТР (~680 станций)
за период с 1.12.2013 по 31.08.2014 г. с заблаговременностью 30 ч**

Модель	NN	U	ETS	PIR	BIAS	ABS
UKMO	180270	81	0,34	0,58	0,44	0,87
NCEP	181573	83	0,34	0,56	0,07	0,67
JAPAN	180947	82	0,29	0,47	-0,09	0,71
T169L31	180319	82	0,30	0,44	0,40	1,05
T339L31	175718	82	0,33	0,48	0,52	1,09
PLAV	180321	84	0,33	0,51	-0,13	0,60
Region	178300	82	0,27	0,43	0,06	0,77
COSMO7	177588	85	0,36	0,55	-0,05	0,64
COSMO13	171852	84	0,36	0,56	0,13	0,76
aUNC	181573	87	0,41	0,55	0,04	0,66

Таблица 4

Результаты оценки прогноза дневных осадков по ЕТР (~680 станций) за период с 1.12.2013 по 31.08.2014 г. с заблаговременностью 42 ч

Модель	NN	U	ETS	PIR	BIAS	ABS
UKMO	177145	75	0,26	0,48	0,76	1,25
NCEP	182865	82	0,36	0,56	0,01	0,79
JAPAN	182232	81	0,31	0,49	-0,07	0,88
T169L31	181598	80	0,30	0,45	0,33	1,23
T339L31	176332	80	0,31	0,47	0,56	1,24
PLAV	181597	80	0,20	0,49	0,40	0,91
Region	179571	79	0,24	0,38	0,10	0,98
COSMO7	177572	83	0,35	0,53	0,02	0,77
COSMO13	172982	80	0,33	0,53	-0,16	0,95
aUNC	182865	85	0,40	0,56	0,12	0,79

Таблица 5

Результаты оценки прогноза дневных осадков по ЕТР (~680 станций) за период с 1.12.2013 по 31.08.2014 г. с заблаговременностью 54 ч

Модель	NN	U	ETS	PIR	BIAS	ABS
UKMO	176107	73	0,19	0,41	0,62	1,10
NCEP	1800447	82	0,32	0,52	0,02	0,71
JAPAN	179829	81	0,26	0,44	-0,11	0,74
T169L31	179204	79	0,25	0,40	0,51	1,25
T339L31	174016	79	0,27	0,43	0,56	1,26
PLAV	179207	82	0,29	0,47	-0,11	0,69
COSMO7	173284	83	0,31	0,49	-0,07	0,72
COSMO13	170102	80	0,28	0,48	0,21	0,94
aUNC	180447	85	0,35	0,50	-0,09	0,65

Коллективу разработчиков рекомендовано продолжить усовершенствование модели Т339L31 и обеспечить перевод технологии на новый вариант ОА (3D-Var) Гидрометцентра России, обеспечить перевод передач прогностической продукции для потребителей Т339L31 в полном объеме соответствующих видов продукции предшествующей версии Т169L31.

Разработчики технологии выпуска глобальных среднесрочных прогнозов погоды выражают искреннюю благодарность отделу систем информационного обеспечения Гидрометцентра России под руководством И.И. Жабиной за организацию и обеспечение информационного сопровождения данной технологии.

Список литературы

1. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2009.

2. *Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Пономарева Т.Я., Цветков В.И., Алферов Ю.В., Васькова Д.В.* Технология оперативного выпуска глобальных прогнозов на 1–10 суток на основе модели Т169L31 (шаг сетки 60–70 км) на новой суперкомпьютерной технике ММЦ Москва // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 121–145.

3. *Толстых М.А.* Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ОАО ФОР, 2010. – 111 с.

4. *Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Горин В.Е., Горбунов М.Е., Ордин А.Л., Багров А.Н.* Новая технология объективного анализа на основе схемы 3D-VAR // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. – С. 6–14.

Е.М. Вербицкая, С.О. Романский

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КРАТКОСРОЧНЫХ ОПЕРАТИВНЫХ ПРОГНОЗОВ МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ WRF-ARW «ХАБ-15» В ПУНКТАХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РОССИИ

Введение

В Вычислительном центре Регионального специализированного метеорологического центра Всемирной службы погоды в г. Хабаровске (ПСМЦ Хабаровск) на высокопроизводительной платформе SGI Altix 4700 функционирует система численных прогнозов погоды на базе негидростатической модели Weather Research and Forecasting с динамическим ядром Advanced Research WRF (WRF-ARW) [4, 5] для территории Дальнего Востока России [3].

Согласно Плана испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов Росгидромета на 2014–2015 гг., испытывались методы краткосрочного (до 72 часов) прогноза элементов погоды (экстремальных и срочных значений температуры воздуха у Земли, скорости и направления приземного ветра, полусуточных сумм осадков) в пунктах Дальневосточного региона России (всего 333 пункта) по данным модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км (условное название «Хаб-15»). Испытания проходили в период с 1 января по 31 декабря 2014 года.

1. Система численных прогнозов погоды на базе модели WRF-ARW для Дальневосточного региона России

Модель WRF-ARW разработана и развивается сообществом исследовательских организаций США, в том числе Национальным

центром исследований атмосферы (NCAR), группой Национальных центров прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP) и др.

Вычислительное ядро ARW основано на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием специальной вертикальной орографической координаты η , которая определяется через гидростатическую составляющую давления. Система уравнений, записанная для возмущений метеорологических величин, включает эволюционные уравнения для расчета трех компонент вектора ветра, геопотенциала, потенциальной температуры, уравнение баланса массы и ряд дополнительных диагностических соотношений [4]. Уравнения модели рассчитываются численно с использованием модифицированного метода Рунге–Кутты. Исходный код модели свободно распространяется и обновляется примерно два раза в год. В работе испытывалась модель версии 3.4.1.

Модель инициализируется и использует в качестве граничных данных прогнозы модели Global Forecasting System с разрешением $0,5^\circ$ (NCEP). По вертикали от уровня Земли до изобарической поверхности 50 гПа задана неравномерная сетка из 31 уровня с наиболее подробным разрешением в пограничном слое атмосферы. Область расчета модели состоит из одного домена. Он покрывает территорию примерно ограниченную $30\text{--}70^\circ$ с. ш. и $100\text{--}170^\circ$ в. д. сеткой, включающей 501 на 401 точек с шагом по горизонтали в 15 км. Центральная точка сетки находится в Хабаровске. Область расчета выбрана так, чтобы покрыть основные регионы, оказывающие влияние на атмосферные процессы Дальнего Востока России. Шаг по времени составляет 60 с. Время одного расчета составляет порядка четырех часов на суперкомпьютере SGI Altix 4700 производительностью 0,6 ТФлопс.

Параметризации различных процессов для модели WRF-ARW были подобраны ранее на анализе и сравнении расчетов за 2011–2012 гг. [3]. Схема конвекции Betts-Miller-Janjic выбрана потому, что она была протестирована во многих других работах. Параметризация почвы и подстилающей поверхности NOAH – наиболее универсальная параметризация такого типа в модели WRF. Эта схема согласуется со схемой параметризации пограничного слоя Yonsei University и схемой

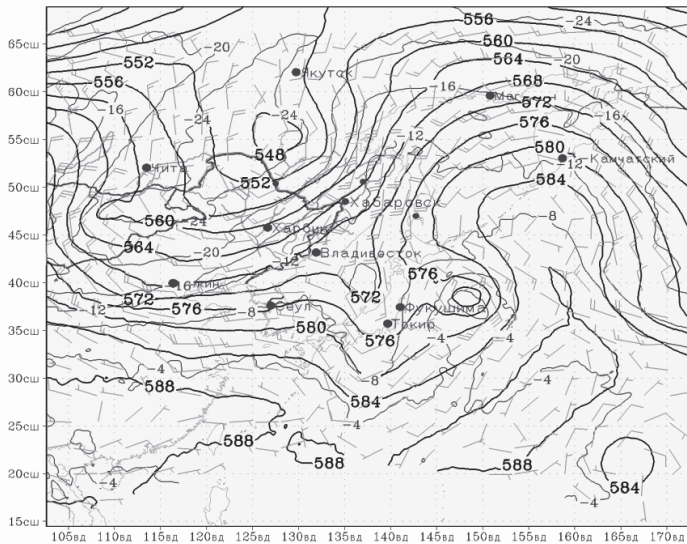
подобия приземного слоя MM5. Параметризации коротковолновой радиации Dudhia и Rapid Radiative Transfer Model выбраны потому, что они реализованы во многих моделях прогноза погоды и протестированы для различных случаев. Параметризация микрофизики WRF Single-Moment 5-class подходит для применения на сетках с шагом более 10 км.

Расчеты прогнозов выполнялись на вычислительных ресурсах РСМЦ Хабаровск один раз в сутки от 00 ч ВСВ в течение 2014 г. под методическим сопровождением специалистов отдела гидрометеорологических исследований и прогнозов ФГБУ «ДВНИГМИ». Для проведения испытаний выходная прогностическая информация фиксировалась на серверах РСМЦ Хабаровск. По полному списку станций прогнозы передавались на сайт ДВНИГМИ. По станциям зоны обслуживания Дальневосточного УГМС прогнозы выкладывались на сервер общего пользования для синоптиков отдела краткосрочных прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

Выходная продукция модели представлена картами-слайдами, на которые нанесены метеорологические поля, информационными метеограммами и прогностическими таблицами по перечню пунктов прогноза. Встроенный в модель WRF постпроцессор Unified Post Processor практически не используется, выходная продукция генерируется программами, созданными сотрудниками отдела гидрометеорологических исследований и прогнозов ДВНИГМИ.

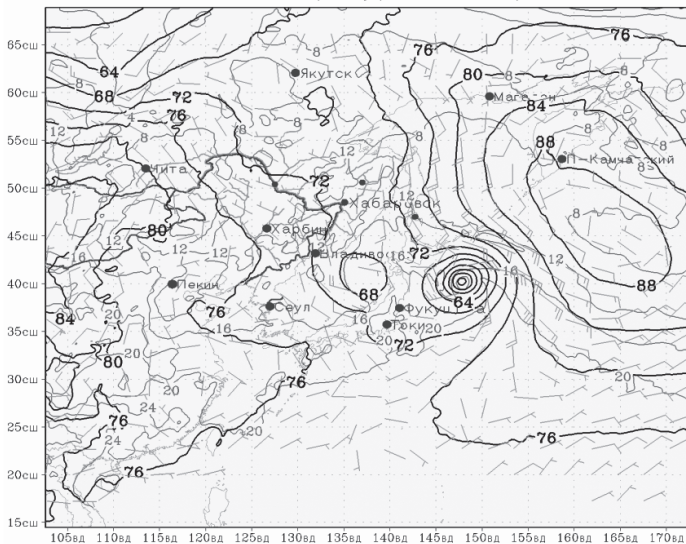
Перечень выходной продукции отличается для УГМС региона в связи со спецификой их деятельности и физико-географическими особенностями территории обслуживания. Срочные карты-слайды по высотам включают карты с наноской полей геопотенциала, ветра и температуры на стандартных изобарических поверхностях. На приземные карты наносятся, как правило, поля трехчасовых сумм осадков, облачности по ярусам или общего балла облачности, приземного ветра, температуры у Земли, давления на уровне моря, зон сильного ветра у Земли. Строятся также карты-слайды давления на уровне моря и накопленных сумм осадков, карты индекса грозовой активности и ряд других карт специализированных прогнозов. Примеры карт приведены на рис. 1. На метеограммы наносится прогностическая информация в пунктах с заблаговременностью до 72 часов.

Геопотенциал, температура и ветер на 500 гПа



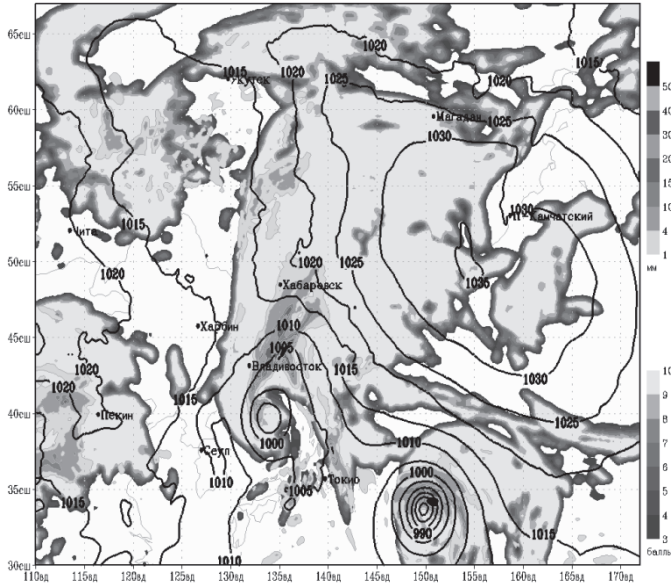
1а

Геопотенциал, температура и ветер на 925 гПа



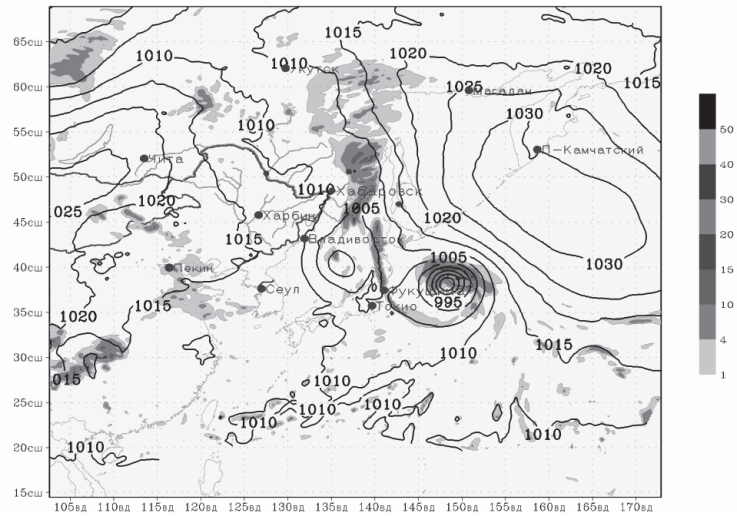
1б

Осадки за 3ч. Давление на ур. моря. Облачность

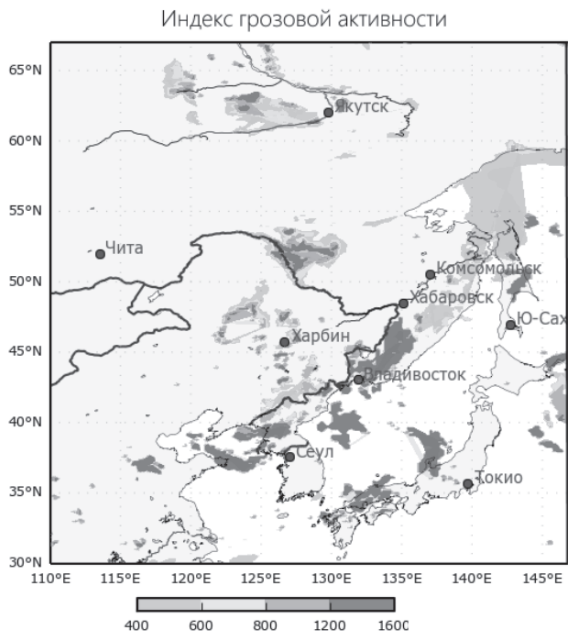


1в

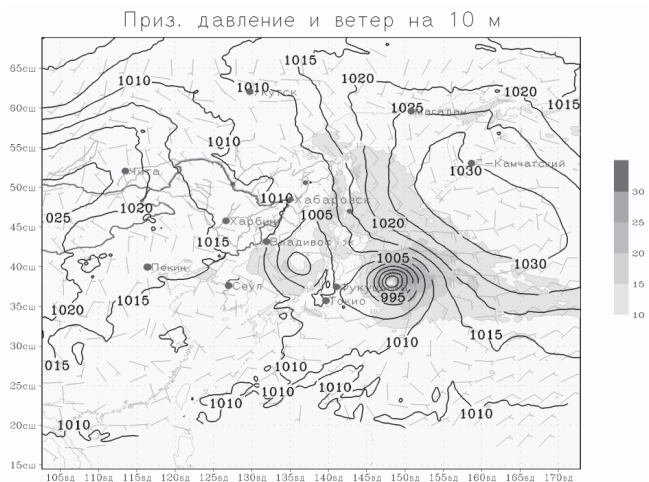
Приз. давление и осадки



1г



1д



1е

Рис. 1. Образцы карт-слайдов модели WRF-ARW «Хаб-15» (выпускаются в цветном виде).

Метеограмма имеет модульную структуру и состоит из четырех блоков (рис. 2).

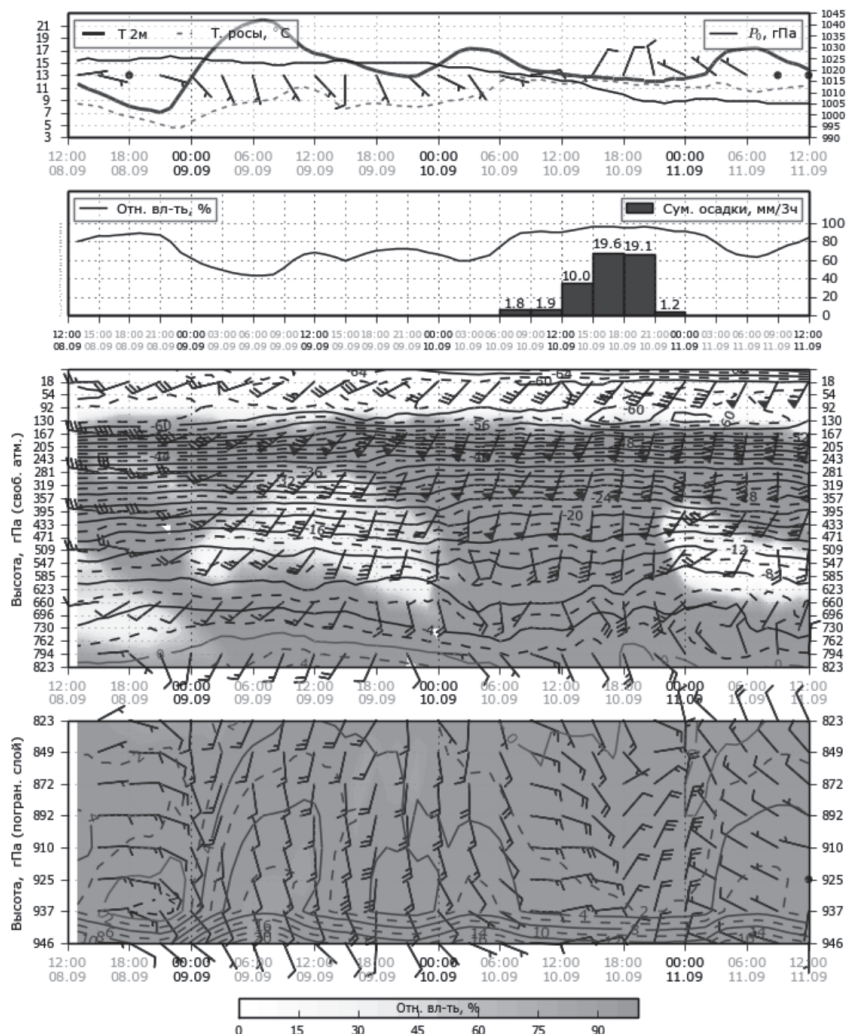


Рис. 2. Пример метеограммы в пункте, построенной по данным модели WRF-ARW «Хаб-15» (выпускаются в цветном виде).

На первом блоке нанесена приземная информация – температура и точка росы на высоте 2 м, ветер на высоте 10 м (перьями) и давление на уровне моря; на втором – информация об осадках, облачности и относительной влажности на высоте 2 м; третий и четвертый блоки представляют собой вертикальный разрез атмосферы (приземный слой и свободная атмосфера) в точке, развернутый во времени, на котором представлена информация на модельных уровнях о температуре, ветре и относительной влажности. Текстовые таблицы содержат прогнозы срочных значений скорости и направлении ветра на высоте 10 м, давления на уровне моря, срочной и экстремальной температуры воздуха у Земли, полусуточных и шестичасовых сумм осадков в пунктах.

В Дальневосточное, Якутское, Забайкальское, Сахалинское и Приморское УГМС, Ситуационный центр Росгидромета и другим потребителям поступают указанные образцы продукции и специализированные прогнозы по данным модели «Хаб-15». Возможна передача результатов работы модели в цифровом коде GRIB на стандартных изобарических поверхностях и вблизи Земли. В частности, такая продукция используется в геоинформационной системе «МЕТЕО ДВ», предназначенной для мониторинга и прогнозирования погоды на территории Дальнего Востока России. Прогнозы в виде карт-слайдов и прогностических таблиц в оперативном режиме представлены на сайте ДВНИГМИ (ferhri.org).

2. Результаты оперативных испытаний

На территории Дальневосточного региона России расположено восемь УГМС Росгидромета, обслуживающих закрепленную за ними территорию: Дальневосточное УГМС – зона обслуживания охватывает территории Хабаровского края, Еврейской автономной области и Амурской области, для испытаний выбрано 77 станций; Забайкальское УГМС – зона обслуживания охватывает территории Забайкальского края и Республики Бурятия (93 станции); Камчатское УГМС – зона обслуживания Камчатский край (23 станции); Колымское УГМС – зона обслуживания Магаданская область (32 станции); Приморское УГМС – зона обслуживания Приморский край (43 станции); Сахалинское УГМС – зона обслуживания Сахалинская область (о. Сахалин и Курильские острова) (12 станций); Чукотское УГМС – зона обслуживания

Чукотский автономный округ (24 станции); Якутское УГМС – зона обслуживания территории республики Саха (Якутия) (29 станций).

Качество прогнозов оценивалось по совокупности числовых характеристик, рекомендованных РД 52.27.284-91 [1]. Оценивалось также значение общей оправдываемости прогнозов в пункте согласно РД 52.27.724-2009 [2] и ряд дополнительных характеристик.

Целью испытаний является определение степени прогностической ценности рассчитываемых прогнозов по модели WRF-ARW «Хаб-15» для возможности их применения в производственной практике УГМС Дальневосточного региона России.

2.1. Прогноз срочных значений температуры воздуха у Земли

Качество прогноза приземной температуры оценивалось по характеристикам обеспеченности ошибки прогноза в заданных градациях: P_1 , P_2 , P_5 – обеспеченность ошибки прогноза в градациях 1, 2, 5 °С; P_n – оправдываемость прогноза по Наставлению [2]; E_{ap} , E_{abc} – соответственно, средняя арифметическая (систематическая, из прогноза вычитается факт) и средняя абсолютная ошибки прогноза. Оценки качества прогнозов срочных значений температуры воздуха у Земли, осредненные по 333 станциям, расположенным на территории Дальнего Востока России, представлены в табл. 1.

Анализ оценок показывает, что среднегодовая оправдываемость прогнозов по Наставлению [2] находится в пределах 68–58 %, снижаясь по мере увеличения заблаговременности прогнозов. Среднегодовой процент прогнозов с ошибкой менее 5 °С (P_5), приемлемой для прогноза температуры воздуха у Земли по территории, изменяется в пределах от 81 до 74 %, также снижаясь с увеличением заблаговременности, и имеет минимальное значение на срок 16 ч по хабаровскому времени (+10 ч ВСВ) на третьи сутки прогноза.

Для всех заблаговременностей оценки имеют ярко выраженный сезонный ход с максимумом летом: от $P_n=87$ % (заблаговременность 42 ч, на срок 4 ч хабаровского времени) и $P_5=95$ % (на тот же срок и заблаговременность) до $P_n=72$ % (заблаговременность 24 ч, на срок 10 ч хабаровского времени) и $P_5=85$ % (на тот же срок и заблаговременность). Минимальные значения оценок наблюдаются зимой: $\min(P_n)=46$ %, $\min(P_5)=61$ % на срок 16 ч хабаровского времени, заблаговременность 54 часа.

Таблица 1

**Оценки качества прогноза срочных значений температуры воздуха у Земли,
осредненные по 333 станциям Дальнего Востока России,
по модели WRF-ARW «Хаб-15»**

(в скобках указано местное время по Хабаровскому часовому поясу)

Заблаго- временность	Период	Характеристики							
		N	P ₁	P ₂	P _n	P ₅	P>5	E _{ар}	E _{абс}
24 (10 ч)	Зима	13200	21	37	58	73	27	1,0	3,9
	Весна	10727	31	50	72	85	15	0,5	2,8
	Лето	10786	31	51	72	85	15	1,8	2,8
	Осень	12085	29	49	69	81	19	1,3	3,2
	Год	46798	28	46	67	81	19	1,1	3,2
30 (16 ч)	Зима	13111	18	31	49	66	34	-2,1	4,3
	Весна	10645	21	38	58	76	24	-2,8	3,5
	Лето	10712	39	62	84	93	7	-0,5	2,2
	Осень	11988	26	46	71	86	14	-1,8	2,9
	Год	46459	26	44	65	80	20	-1,8	3,3
36 (22 ч)	Зима	13007	18	33	51	65	35	-0,8	4,5
	Весна	10615	26	43	63	77	23	-2,3	3,5
	Лето	10704	37	61	82	93	7	-1,3	2,2
	Осень	11900	32	52	74	86	14	0,1	2,9
	Год	46226	28	47	67	80	20	-1,0	3,3
42 (04 ч)	Зима	12787	19	33	51	66	34	0,7	4,6
	Весна	10687	28	47	67	81	19	-0,2	3,2
	Лето	10521	42	67	87	95	5	-0,1	1,9
	Осень	11708	27	44	64	78	22	1,5	3,5
	Год	45703	28	47	67	79	21	0,5	3,4
48 (10 ч)	Зима	13221	20	34	51	66	34	1,1	4,6
	Весна	10957	25	44	66	82	18	-1,3	3,2
	Лето	10756	35	57	79	91	9	0,2	2,4
	Осень	12077	28	47	66	79	21	1,1	3,4
	Год	470011	26	45	65	79	21	0,3	3,4

Таблица 1 (окончание)

Заблаго- временность	Период	Характеристики							
		N	P ₁	P ₂	P _n	P ₅	P>5	E _{ар}	E _{абс}
54 (16 ч)	Зима	13096	16	29	46	61	39	-1,9	4,8
	Весна	10904	16	30	48	65	35	-3,7	4,3
	Лето	10728	32	53	77	90	10	-1,2	2,5
	Осень	12031	25	42	65	81	19	-1,6	3,3
	Год	46759	22	38	58	74	26	-2,1	3,8
60 (22 ч)	Зима	13023	17	30	47	61	39	-0,6	5,0
	Весна	10809	23	39	58	72	28	-2,9	3,9
	Лето	10679	33	54	78	90	10	-1,7	2,5
	Осень	11874	29	48	69	82	18	0,3	3,2
	Год	46385	25	42	62	76	25	-1,2	3,7
72 (10 ч)	Зима	12739	18	31	48	62	38	1,3	5,0
	Весна	10970	24	40	62	78	22	-1,7	3,4
	Лето	10549	32	53	76	89	11	-0,3	2,6
	Осень	12079	26	43	63	76	24	1,3	3,7
	Год	46337	25	41	62	76	24	0,2	3,8

Следует отметить, что рассматриваемая территория включает в себя четыре часовых пояса по настоящему регламенту для территории России. По солнечному времени различия для станций достигают шесть часов. При анализе оценок для территорий каждого УГМС заметен суточный ход оценочных характеристик, он наиболее ярко выражен на внутриконтинентальных территориях, где сроки прогноза близки ко времени формирования суточных экстремумов температуры воздуха у Земли и времени наступления заката и рассвета, когда на внутриконтинентальных станциях наблюдается максимальная скорость изменения приземной температуры.

Наиболее низкие оценки получены для территории Якутского и Забайкальского УГМС. Самые высокие оценки получены на территории Сахалинской области. Для всех территорий наиболее низкое качество

прогнозов наблюдается зимой, повышается весной и имеет максимум летом, снижаясь осенью. По самым восточным территориям (Чукотка, Камчатка, Сахалин) качество прогнозов осенью практически сравнимо с летними прогнозами, а на Сахалине даже превышает летние показатели. Аналогичными свойствами обладают и стартовые поля температуры воздуха у Земли (NCEP, 00 ч ВСВ), но летом испытываемая модель заметно улучшает качество приземных температур, а зимой, наоборот, быстро ухудшает. Это свидетельствует о некоторой неадекватности параметризации радиационных процессов (особенно коротковолновой радиации) для рассматриваемой территории в холодный период года. Модель не показывает реального прогрева воздуха в дневное время зимой, а в летний период этот прогрев прогнозируется хорошо. Модель не показывает скорость изменения приземной температуры при восходе и закате Солнца, которая велика для внутриконтинентальных станций. В целом радиационные параметризации модели WRF-ARW вполне адекватно работают в теплых влажных воздушных массах над достаточно прогретой подстилающей поверхностью и совсем плохо в сухих и холодных воздушных массах над подстилающей поверхностью с низкими отрицательными температурами.

Качество прогнозов в городах, являющихся административными центрами, как правило, выше, чем в среднем по территориям. Это особенно заметно для Хабаровска, Петропавловска-Камчатского, Магадана и Владивостока и объясняется расположением крупных городов в наиболее благоприятных географических условиях в сравнении с другими пунктами территории. Исключения составляют Чита и Южно-Сахалинск. Анализ данных табл. 2 позволяет выделить территории, города и сезоны года, для которых продукция испытываемой модели имеет прогностическую ценность и может использоваться в оперативной практике. Здесь в каждой ячейке (через тире) приведены максимальные и минимальные значения P_3 и P_5 для территорий каждого УГМС Дальневосточного региона России в верхнем блоке таблицы и значения P_3 и E_{abc} для административных центров в нижней части таблицы. Рекомендации по использованию прогнозов срочных значений температуры воздуха у Земли представлены в табл. 3.

Таблица 2

Интервалы изменений (макс–мин) основных оценок качества прогнозов
срочных значений температуры воздуха у Земли по модели WRF-ARW «Хаб–15»
по территориям и административным центрам Дальнего Востока России

УГМС	Т срочные (P ₃ , %)					Т срочные (P ₅ , %)				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
	Дальневосточное (77)	58–35	73–45	91–79	78–65	68–55	75–49	87–60	98–91	89–79
Забайкальское (93)	53–39	64–41	86–54	72–42	69–51	69–52	87–60	96–71	87–57	80–68
Якутское (29)	55–42	70–41	85–64	70–55	64–52	69–56	83–57	96–71	82–69	78–68
Кольмское (32)	54–46	67–40	89–73	70–59	68–56	69–58	84–60	96–88	80–71	81–72
Чукотское (24)	59–52	76–62	82–74	81–68	73–64	80–69	88–77	96–86	90–80	84–78
Камчатское (23)	67–55	83–62	92–71	81–76	77–69	72–66	94–80	98–86	92–84	84–78
Сахалинское (12)	79–65	83–72	93–81	94–83	85–77	88–76	97–85	98–92	98–92	94–89
Приморское (24)	61–38	81–50	87–72	87–72	72–58	76–52	81–66	96–87	87–78	86–70
ДВ-регион (333)	58–47	72–48	87–76	71–64	67–58	73–61	85–65	95–89	86–76	81–74
Административный центр	Т срочные (P ₃ , %)					Т срочные (P ₅ , %)				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
	Хабаровск	62–36	84–61	100–91	92–78	81–67	3,2–5,7	2,0–3,8	1,2–1,7	2,0–3,2
Чита	48–27	74–44	91–35	78–51	67–36	3,9–6,4	2,8–5,7	1,5–5,6	2,4–4,1	3,2–4,5
Якутск	73–41	78–41	96–74	84–55	81–60	3,0–4,5	2,9–4,9	1,3–2,5	2,0–3,9	2,6–3,9
Магадан	89–77	89–75	100–89	98–76	91–80	1,8–2,5	1,7–3,1	0,9–2,0	1,3–2,9	1,7–2,3
Анадырь	70–62	89–72	95–72	90–74	81–74	2,2–3,4	2,0–3,1	1,7–2,7	1,5–2,4	2,3–2,7
Петропавловск	100–89	98–80	94–78	100–94	94–88	1,6–2,2	1,5–2,3	1,4–2,7	1,2–1,6	1,5–2,0
Южно-Сахалинск	76–48	91–93	96–72	94–74	83–65	2,8–4,2	1,8–3,4	1,7–2,8	1,7–3,0	2,2–2,5
Владивосток	89–70	91–63	96–74	94–74	83–65	1,9–2,9	1,8–2,7	1,1–2,1	1,4–2,5	1,8–2,2

Таблица 3

Рекомендации по использованию прогнозов срочных значений температуры воздуха у Земли по модели WRF-ARW «Хаб-15» по территориям и административным центрам Дальнего Востока России

УГМС	Зима	Весна	Лето	Осень
Дальневосточное	—	—	консультат.	—
Забайкальское	—	—	консультат.	—
Якутское	—	—	консультат.	—
Чукотское	—	—	консультат.	консультат.
Колымское	—	—	консультат.	—
Камчатское	—	консультат.	вспомогат. до 48ч	консультат.
Сахалинское	консультат.	вспомогат.	вспомогат.	вспомогат.
Приморское	—	консультат.	вспомогат. до 48ч	—
Административный центр	Зима	Весна	Лето	Осень
Хабаровск	консультат.	консультат.	основной	консультат.
Чита	—	—	консультат.	—
Якутск	—	—	вспомогат.	консультат.
Анадырь	—	консультат.	вспомогат.	вспомогат. до 48ч
Магадан	консультат.	вспомогат.	основной	основной до 48ч
Петропавловск	основной	основной	основной	основной
Южно-Сахалинск	—	консультат.	вспомогат.	вспомогат.
Владивосток	консультат.	консультат.	основной	основной

Примечание. Знаком «тире» отмечены территории и сезоны года, в которых модельные прогнозы использовать не рекомендуется.

В заключение заметим, что наиболее низкие значения оценок наблюдаются на третьи сутки прогноза, причем для станций Забайкальского УГМС в среднем это срок 21 ч местного времени (м. вр.), по отдельным станциям — 9 ч м. вр. Для внутриконтинентальных станций остальной территории Дальневосточного региона России это обычно срок, наиболее близкий к суточному максимуму (15–17 ч м. вр.). Для территорий и пунктов прибрежной зоны Дальнего Востока наихудшее качество прогнозов приходится на последнюю заблаговременность (72 часа).

2.2. Прогноз суточных экстремумов температуры воздуха у Земли

Анализ оценок качества прогнозов суточных экстремумов температуры воздуха у Земли, осредненных по станциям каждого УГМС и в целом по 333 станциям Дальнего Востока России, показывает, что оценки качества суточных экстремумов температуры воздуха у Земли как в среднем по территории Дальневосточного региона России, так и по отдельным УГМС и административным центрам имеют те же особенности, что и оценки прогнозов срочных значений температуры. В среднем значения оценок несколько ниже, чем для срочных температур, что естественно. Качество прогнозов по административным центрам выше, чем в среднем по территориям УГМС.

В табл. 4 приведены оценки только в тех ситуациях, когда модельные прогнозы могут рассматриваться как имеющие некоторую прогностическую ценность. Результаты всестороннего анализа этих ситуаций с учетом значений P_3 и P_5 , E_{ap} и E_{abc} сведены в табл. 5 в форме рекомендаций по возможности использования прогнозов в оперативной практике УГМС. При этом в качестве консультативного метод рекомендован в случае, если средняя по заблаговременностям обеспеченность прогнозов в трехградусном интервале (P_3) составляла от 80 до 85 %. В качестве вспомогательного прогноз рекомендован при $85 < P_3 < 95$ %. В качестве основного прогнозы рекомендованы в случае, когда $P_3 > 95$ % по обеим заблаговременностям.

Таблица 4

Интервалы изменений (макс–мин) основных оценок качества прогнозов суточных экстремумов температуры воздуха у Земли по модели WRF-ARW «Хаб-15» по территориям и административным центрам Дальнего Востока России

УГМС	Т _{мин} (P_3 , %)				Т _{макс} (P_5 , %)			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Дальневосточное	–	–	88	–	–	–	–	–
Забайкальское	–	–	80–78	–	–	–	79–82	–
Якутское	–	–	85–80	–	–	–	81–79	–
Колымское	–	–	–	–	–	–	–	–
Чукотское	–	–	81–82	–	–	–	–	–
Камчатское	–	–	90–89	–	–	–	77–83	86–83

Таблица 4 (окончание)

УГМС	Т _{мин} (P ₃ , %)				Т _{макс} (P ₅ , %)			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Сахалинское	–	85	89–88	79–80	74–80	75	82–79	94
Приморское	–	–	87–84	–	–	–	–	–
ДВ-регион	48–64	60–85	75–90	44–80	47–80	39–75	63–83	63–94
Административный центр	Т _{мин} (P ₃ , %)				Т _{макс} (P ₅ , %)			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Хабаровск	–	–	96–98	79– 85	–	–	98	88–77
Чита	–	–	96–93	–	–	–	–	–
Якутск	–	–	89	–	–	–	94	–
Магадан	–	–	89	–	77–80	–	87	84–69
Анадырь	–	91	97–100	–	87–79	80	85	84–66
Петропавловск	–	96–98	98–93	86–82	95–96	87	86	100–97
Южно-Сахалинск	–	84– 85	91	–	73– 100	–	76	84–75
Владивосток	86–87	93	96	84– 88	–	82	91	94–91
P (%)	36–87	54–98	89–100	57–88	43– 100	36– 87	61– 98	63– 100

Примечание. Знаком «тире» отмечены территории и сезоны года, в которых модельные прогнозы использовать не рекомендуется.

2.3. Прогноз срочных значений скорости и направления ветра на высоте 10 м

Качество прогноза приземного ветра оценивалось по следующим характеристикам: $E_{\text{абсV}}$ – средняя абсолютная ошибка вектора ветра; SKV – среднеквадратическая ошибка вектора ветра; $E_{\text{ар}}$ – средняя арифметическая (систематическая) ошибка скорости ветра (из прогноза вычитаем факт); $E_{\text{абс}}$ – средняя абсолютная ошибка прогноза скорости ветра и средняя абсолютная ошибка прогноза направления ветра; $P_{\text{н}}$ – оправдываемость прогноза скорости ветра по Наставлению [2]; P_{DD} – оправдываемость прогноза направления ветра – частота случаев с ошибкой в направлении ветра, не превышающей 1 румб (22,5°).

Оценки качества прогнозов срочных значений скорости и направления ветра, осредненные по 333 станциям территории Дальнего Востока России,

Таблица 5

Рекомендации по использованию прогнозов суточных экстремумов температуры воздуха у Земли по модели WRF-ARW «Хаб-15» по территориям и административным центрам Дальнего Востока России

УГМС	Т мин				Т макс			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
	Дальневосточное	—	—	вспомог.	—	—	—	—
Забайкальское	—	—	—	—	—	консулт.	—	—
Якутское	—	—	консулт.	—	—	консулт.	—	—
Колымское	—	—	—	—	—	—	—	—
Чукотское	—	—	консулт.	—	—	—	—	—
Камчатское	—	—	вспомог.	—	—	консулт.	консулт.	консулт.
Сахалинское	—	консулт.	вспомог.	консулт.	—	—	консулт.	вспомог.
Приморское	—	—	вспомог.	—	—	—	—	—
Административный центр	Т мин				Т макс			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Хабаровск	—	—	основной	консулт.	—	—	основной	консулт.
Чита	—	—	основной	—	—	—	—	—
Якутск	—	—	консулт.	—	—	—	основной	—
Магадан	—	—	консулт.	—	—	—	консулт.	консулт.
Анадырь	—	вспомог.	основной	—	консулт.	консулт.	консулт.	консулт.
Петропавловск	—	основной	основной	консулт.	основной	консулт.	консулт.	основной
Южно-Сахалинск	—	консулт.	вспомог.	—	вспомог.	—	—	консулт.
Владивосток	консулт.	вспомог.	основной	консулт.	—	консулт.	вспомог.	вспомог.

представлены в табл. 6. Оценки качества прогнозов направления ветра считались только для случаев, когда скорость ветра была не менее 5 м/с. В таблице под значением заблаговременности указан срок, на который дается прогноз по хабаровскому времени.

Таблица 6

Оценки качества прогноза срочных значений температуры воздуха у Земли, осредненные по 333 станциям Дальнего Востока России, по модели WRF-ARW «Хаб-15»

Заблаговременность (м. вр)	Период	Характеристики								
		Количество		Вектор		Скорость			Направление	
		N	N>5*	E _{abc}	SKV	E _{ap}	E _{abc}	P _n	E _{ap}	P _{DD}
24 (10 ч)	Зима	13180	1406	2,4	3,0	0,9	1,7	97	20	75
	Весна	10718	995	2,4	2,9	0,5	1,5	97	21	78
	Лето	10774	631	2,2	2,7	0,3	1,2	98	23	76
	Осень	12082	1128	2,3	2,9	0,7	1,5	97	21	80
	Год	46754	4160	2,3	2,9	0,6	1,5	97	21	77
30 (16 ч)	Зима	13095	1614	2,8	3,6	1,2	1,9	94	22	76
	Весна	10631	1607	2,9	3,6	0,6	1,7	94	23	76
	Лето	10697	929	2,8	3,3	0,6	1,6	97	27	71
	Осень	11981	1441	2,7	3,4	0,9	1,7	95	20	80
	Год	46404	5591	2,8	3,5	0,8	1,7	95	23	76
36 (22 ч)	Зима	12996	1381	3,0	3,8	1,7	2,2	93	24	75
	Весна	10601	751	2,8	3,3	1,2	1,9	96	17	70
	Лето	10688	456	2,4	2,9	0,8	1,6	98	31	68
	Осень	11888	1050	2,9	3,5	1,4	2,0	95	23	76
	Год	46173	3638	2,8	3,4	1,3	1,9	95	25	73
42 (04 ч)	Зима	12780	1316	3,1	3,9	1,8	2,3	92	25	74
	Весна	10678	606	2,8	3,4	1,5	2,0	96	24	73
	Лето	10510	391	2,4	2,9	1,1	1,7	98	28	71
	Осень	11704	1020	3,0	3,6	1,6	2,1	94	25	75
	Год	45672	3333	2,8	3,5	1,5	2,0	95	25	74

Таблица 6 (окончание)

Заблаговременность (м. вр)	Период	Характеристики								
		Количество		Вектор		Скорость			Направление	
		N	N>5*	E _{abc}	SKV	E _{ар}	E _{abc}	P _n	E _{ар}	P _{DD}
48 (10 ч)	Зима	13208	1410	3,2	4,0	1,9	2,4	92	24	75
	Весна	10946	974	3,0	3,6	1,3	2,0	94	24	76
	Лето	10732	578	2,6	3,1	0,8	1,6	98	27	72
	Осень	12077	1176	3,1	3,6	1,6	2,2	93	24	77
	Год	46963	4138	3,0	3,6	1,4	2,1	94	24	75
54 (16 ч)	Зима	13076	1582	3,0	3,9	1,4	2,1	92	24	74
	Весна	10893	1551	3,2	3,8	0,8	1,9	93	27	72
	Лето	10705	921	3,0	3,6	0,7	1,7	96	30	68
	Осень	12027	1499	3,1	3,8	1,3	2,0	93	25	74
	Год	46701	5553	3,1	3,8	1,1	1,9	93	26	72
60 (22 ч)	Зима	13002	1306	3,3	4,2	1,9	2,5	91	27	70
	Весна	10799	650	3,0	3,6	1,3	2,0	95	29	70
	Лето	10666	470	2,6	3,2	1,0	1,7	97	34	65
	Осень	11854	1035	3,2	3,9	1,8	2,3	92	26	72
	Год	46321	3461	3,1	3,8	1,5	2,2	94	28	70
72 (10 ч)	Зима	12719	1298	3,4	4,2	2,0	2,5	91	28	69
	Весна	10960	984	3,4	4,1	1,5	2,2	92	29	68
	Лето	10538	609	2,8	3,4	0,9	1,7	97	32	66
	Осень	12075	1138	3,4	4,2	1,8	2,4	92	27	72
	Год	46292	4029	3,2	4,0	1,6	2,2	93	29	69

Примечание. В таблице в столбце N>5 приведено количество случаев, когда наблюдался ветер со скоростью более 5 м/с. Направление оценивалось только для этих случаев.

Анализ оценочных характеристик показывает следующее. На территории Дальнего Востока России в среднем слабый ветер (со скоростями, не превышающими 5 м/с) наблюдался в 86–96 % случаев. Все

характеристики ухудшаются с ростом заблаговременности прогноза и имеют некоторый сезонный ход. Наилучшее качество прогнозов скорости ветра наблюдается летом, а направления – осенью. Наиболее низкое качество прогнозов скорости ветра имеет место зимой. Наблюдается некоторый слабо выраженный суточный ход оценок: они несколько выше в среднем для срока 21 час и ниже для срока 9 часов.

Средняя арифметическая ошибка прогноза всегда положительна (для всех сезонов, сроков и заблаговременностей) и составляет от 0,3 м/с для заблаговременности 24 ч летом до 2,0 м/с для заблаговременности 72 ч зимой, что говорит о некотором завышении в среднем скорости приземного ветра моделью. Этот факт объясняется слишком большим процентом слабых ветров (штилей) в испытываемой выборке. Модель, как правило, несколько завышает значения скорости ветра при штилях и слабых ветрах, а такой ветер имеет преимущественную частоту на рассматриваемой территории. Средняя абсолютная ошибка прогноза меняется от 1,2 м/с (заблаговременность 24 ч летом) до 2,5 м/с (заблаговременность 60 и 72 ч зимой). Оправдываемость прогноза скорости ветра по Наставлению [2] составляет от 91 % зимой для заблаговременностей 60 и 72 ч, до 98 % летом для заблаговременностей 24–48 ч (табл. 7).

Качество прогнозов направления ветра по средней абсолютной ошибке колеблется от 17° весной для заблаговременности 36 ч до 34° летом для заблаговременности 60 ч. Расчет оправдываемости прогнозов направления ветра по Наставлению [2] не предусмотрен. Для испытаний разработчики предложили расчет характеристики P_{DD} , равной проценту случаев с отклонением прогностического ветра от фактически наблюдавшегося не более чем на 22,5° для случаев скоростью ветра ≥ 5 м/с. Как видно из табл. 8, эта характеристика имеет наименьшие значения весной и летом (от 65 % летом для заблаговременности 60 ч до 76–78 % для заблаговременности 24 ч). Наибольшие значения P_{DD} наблюдаются осенью: от 80 % для заблаговременностей 24–36 ч до 72 % для заблаговременностей 60–72 ч. Таким образом, анализ осредненных оценок показывает достаточно высокую оправдываемость прогнозов скорости ветра за весь период испытаний, и такие модельные прогнозы могут быть использованы

Таблица 7

Максимальные и минимальные значения оценок качества прогнозов скорости ветра на высоте 10 м по модели WRF-ARW «Хаб-15» по территориям и административным центрам Дальнего Востока России

УГМС	P _{цр} , % (макс–мин)					E _{абс} (мин–макс)						
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Дальневосточное	98–94	99–94	99–98	99–92	1,4–2,2	1,3–2,2	1,0–1,7	1,3–2,3	1,4–2,2	1,3–2,2	1,0–1,7	1,3–2,3
Забайкальское	99–97	98–95	100–97	99–95	1,6–2,2	1,5–2,3	1,3–1,7	1,4–2,1	1,6–2,2	1,5–2,3	1,3–1,7	1,4–2,1
Якутское	99–98	99–97	100–98	99–97	1,2–1,6	1,3–1,7	1,1–1,5	1,2–1,8	1,2–1,6	1,3–1,7	1,1–1,5	1,2–1,8
Кольмское	93–89	94–90	95–91	94–87	2,0–2,7	1,8–2,3	1,8–2,1	1,6–2,6	2,0–2,7	1,8–2,3	1,8–2,1	1,6–2,6
Чукотское	95–86	96–91	97–95	96–88	1,9–3,0	1,5–2,3	1,4–2,0	1,7–2,6	1,9–3,0	1,5–2,3	1,4–2,0	1,7–2,6
Камчатское	96–89	97–93	99–96	94–88	1,6–2,5	1,3–2,0	1,1–1,6	1,7–2,6	1,6–2,5	1,3–2,0	1,1–1,6	1,7–2,6
Сахалинское	93–82	92–86	97–94	96–85	2,1–3,1	1,8–2,5	1,4–1,9	1,9–2,8	2,1–3,1	1,8–2,5	1,4–1,9	1,9–2,8
Приморское	93–76	94–84	98–93	95–86	2,1–3,8	1,7–2,9	1,2–2,2	1,7–3,0	2,1–3,8	1,7–2,9	1,2–2,2	1,7–3,0
ДВ-регион	97–91	97–92	98–96	97–92	1,7–2,5	1,5–2,2	1,2–1,8	1,5–2,4	1,7–2,5	1,5–2,2	1,2–1,8	1,5–2,4
Административный центр	P _{цр} , % (макс–мин)					E _{абс} (мин–макс)						
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Хабаровск	96–82	98–87	100–96	100–84	1,4–2,3	1,5–2,4	1,2–1,5	1,5–2,4	1,4–2,3	1,5–2,4	1,2–1,5	1,5–2,4
Чита	100–98	100–94	100–96	100–94	1,3–2,0	1,1–2,4	0,9–1,7	0,9–1,9	1,3–2,0	1,1–2,4	0,9–1,7	0,9–1,9
Якутск	100	100–98	100–94	100	0,9–1,5	1,1–1,6	0,8–1,7	0,9–1,5	0,9–1,5	1,1–1,6	0,8–1,7	0,9–1,5
Магадан	91–57	98–74	98–78	98–43	2,0–4,8	1,2–3,5	1,3–2,5	1,8–5,1	2,0–4,8	1,2–3,5	1,3–2,5	1,8–5,1
Анадырь	91–81	96–82	96–82	100–82	3,0–3,7	1,8–3,3	2,1–3,2	1,6–2,7	3,0–3,7	1,8–3,3	2,1–3,2	1,6–2,7
Петропавловск	93–71	93–72	100–93	90–74	2,0–3,4	1,7–3,2	1,3–2,1	2,6–3,7	2,0–3,4	1,7–3,2	1,3–2,1	2,6–3,7
Южно-Сахалинск	98–99	100–89	98–94	100–94	1,3–3,1	1,3–2,3	1,1–1,5	1,3–2,1	1,3–3,1	1,3–2,3	1,1–1,5	1,3–2,1
Владивосток	100–96	94–80	91–80	94–78	1,8–3,8	2,0–3,0	1,8–2,7	1,7–3,2	1,8–3,8	2,0–3,0	1,8–2,7	1,7–3,2

Максимальные и минимальные значения оценок качества прогнозов направления ветра на высоте 10 м* по модели WRF-ARW («Хаб-15») по территориям и административным центрам Дальнего Востока России

УГМС	P _{вд} , % (макс–мин)				E _{абс} (мин–макс)			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Дальневосточное	86–74	87–67	85–66	85–72	19–28	17–34	19–34	18–27
Забайкальское	78–71	72–44	79–45	76–65	20–31	25–53	23–56	23–29
Якутское	84–66	80–64	81–56	87–66	19–34	20–33	19–38	14–31
Кольмское	80–64	94–90	95–91	81–68	20–32	22–32	21–31	20–30
Чукотское	77–67	96–91	65–54	78–62	22–27	25–34	33–45	21–35
Камчатское	71–62	81–67	82–63	80–63	24–33	20–29	20–34	21–32
Сахалинское	88–75	87–73	78–61	89–72	14–27	16–24	20–30	15–24
Приморское	77–63	78–58	84–66	81–69	20–30	21–28	16–36	19–28
ДВ-регион	75–69	78–64	76–64	80–67	22–28	21–33	23–34	20–30
Административный центр	P _{вд} , % (макс–мин)				E _{абс} (мин–макс)			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
Хабаровск	94–67	92–67	100–70	100–73	10–28	10–23	10–23	8–23
Чита	–	–	–	–	–	–	–	–
Якутск	–	–	–	–	–	–	–	–
Магадан	76–53	75–46	75–54	84–60	20–38	19–43	23–41	14–38
Анadyрь	89–73	100–67	–	100–75	15–36	6–31	–	7–19
Петропавловск	73–43	79–44	–	83–55	22–39	19–53	–	–
Южно-Сахалинск	–	–	–	–	7–43	27–49	31–54	–
Владивосток	96–86	94–80	91–80	94–78	8–15	18–31	14–36	15–29

Примечание. * – оценки направления ветра приводятся только для ситуаций, в которых было не менее 10 случаев со скоростью ветра ≥ 5 м/с.

в оперативной практике УГМС Дальнего Востока России в качестве основного метода прогноза скорости приземного ветра. Прогноз направления ветра имеет достаточно надежные характеристики качества зимой, весной и осенью и может использоваться в эти сезоны года в качестве вспомогательного материала на первые-вторые сутки, а летом и на третьи сутки – консультативно.

2.4. Прогноз полусуточных сумм осадков

Качество прогнозов полусуточных сумм осадков оценивалось по следующим характеристикам:

N – общее количество прогнозов, $N = \sum_{i=1}^k m_i$, m_i – количество прогнозов на i -той станции; k – количество станций;

N_{11} – количество случаев, когда осадки прогнозировались и наблюдались;

N_{21} – количество случаев, когда осадки наблюдались, но не прогнозировались;

N_{12} – количество случаев, когда осадки прогнозировались, но не наблюдались;

N_{22} – количество случаев, когда осадки не прогнозировались и не наблюдались;

U – оправдываемость альтернативного прогноза;

U_{oc} – оправдываемость в классе осадков;

U_{60} – оправдываемость в классе без осадков;

P_n – оправдываемость прогноза по наставлению [5];

P_{oc} – предупрежденность класса осадков;

P_{60} – предупрежденность класса без осадков;

TSS – критерий Пирси–Обухова;

HSS – критерий Хейдке–Багрова;

E_{ap} – средняя арифметическая ошибка прогноза;

E_{abc} – средняя абсолютная ошибка прогноза;

BIAS – отношение количества случаев прогноза осадков к фактически наблюдавшемуся количеству случаев с осадками, т. е. $BIAS = (N_{11} + N_{12}) / (N_{11} + N_{21})$.

Оценки качества прогнозов факта наличия и количества осадков, осредненные по 333 станциям Дальнего Востока России, представлены в табл. 9. Приведены характеристики испытываемой выборки по факту:

$N_{oc} (\%) = 100 \cdot (N_{11} + N_{21}) / N$ – фактическая (наблюденная) частота класса осадков;

$N_{60} (\%) = 100 \cdot (N_{12} + N_{22}) / N$ – фактическая (наблюденная) частота класса без осадков;

Данные о частоте ложных прогнозов и пропущенных фактов явления в прогностической выборке:

$PC (\%) = 100 \cdot N_{21} / N$ – процент случаев, когда осадки наблюдались, но не прогнозировались («пропуск цели»);

$LT (\%) = 100 \cdot N_{12} / N$ – частота (процент) случаев, когда осадки прогнозировались, но не наблюдались («ложные тревоги»).

При расчете оценок качества прогнозов за факт осадков принимались: по данным наблюдений – все случаи с осадками, в том числе осадки в количестве 0,00 мм («следы»), по расчетам – значения, превышающие 0,09 мм (уровень отсечения). Данные табл. 9 показывают, что частота класса осадков на рассматриваемой территории существенно меньше частоты класса «без осадков» и находятся преимущественно в соотношении 30 на 70. При этом соотношение частот имеет выраженный сезонный ход: максимальная частота класса осадков наблюдается летом (до 39 % в среднем по территории), минимальная – весной (24–26 %).

Согласно данным табл. 9, в среднем оправдываемость альтернативного прогноза (U) составляет от 81 % (зимой и весной для заблаговременности 12 ч) до 69 % (летом, заблаговременность 60 ч). Среднегодовые характеристики составляют 80, 77, 77, 74, 77 и 73 % по заблаговременностям соответственно. Оправдываемость прогноза по Наставлению [2] меняется от 90 % (зимой и осенью, заблаговременность 12 ч) до 76 % (летом, заблаговременность 72 ч) и для среднегодовых значений составляет 87, 83, 83, 81, 82 и 80 %.

Предупрежденность класса осадков меняется от 71 % (летом, заблаговременность 36 ч) до 57 % (летом, заблаговременность 24, 48 ч). Среднегодовые характеристики составляют 63, 65, 69, 64, 65, 63 % соответственно заблаговременностям прогноза.

Таблица 9

Оценки качества прогноза полусуточных сумм осадков, осредненных по 333 станциям Дальнего Востока России, по модели WRF-ARW «Хаб-15»

Заблаговременность	Период	Характеристики							
		N	N _{oc}	N ₆₀	PC	LT	U%	U _{oc} %	U ₆₀ %
12 ч	Зима	3832	30	70	12	7	81	73	84
	Весна	3061	24	76	8	11	81	58	88
	Лето	3145	39	61	13	13	74	67	79
	Осень	3487	32	68	12	5	83	79	83
	Год	13525	31	69	11	9	80	69	84
24 ч	Зима	13704	32	68	11	11	78	65	84
	Весна	11067	25	75	8	19	73	48	87
	Лето	11253	33	67	14	11	75	62	80
	Осень	12548	31	69	10	10	80	66	85
	Год	48572	30	70	10	13	77	60	84
36 ч	Зима	13734	33	67	11	9	80	70	83
	Весна	11276	26	74	8	13	78	57	87
	Лето	11274	35	65	10	20	70	56	82
	Осень	12594	33	67	10	9	81	72	85
	Год	48878	32	68	10	13	77	63	84
48 ч	Зима	13236	32	68	11	13	76	61	82
	Весна	11345	25	75	8	20	72	45	87
	Лето	11036	32	68	14	15	71	54	79
	Осень	12470	32	68	10	12	77	63	84
	Год	48087	30	70	11	15	74	56	83
60 ч	Зима	6142	36	64	14	11	75	67	78
	Весна	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	493	39	61	13	18	69	58	76
	Осень	8156	35	65	11	11	77	67	82
	Год	14791	36	64	12	11	77	67	80
72 ч	Зима	6142	35	65	14	14	72	60	79
	Весна	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	490	33	67	13	13	74	59	80
	Осень	7879	35	65	12	14	74	61	80
	Год	14511	35	65	13	14	73	61	79

Таблица 9 (окончание)

Заблаговременность	Период	Характеристики							
		P _н %	P _{ос} %	P ₆₀ %	TSS	HSS	E _{ар}	E _{абс}	BIAS
12 ч	Зима	90	61	90	0,52	0,55	0,0	0,1	0,84
	Весна	87	64	86	0,51	0,49	0,1	0,4	1,45
	Лето	79	66	79	0,46	0,46	-0,2	1,3	0,99
	Осень	90	61	92	0,54	0,54	0,0	0,3	0,77
	Год	87	63	87	0,51	0,51	0,0	0,5	0,91
24 ч	Зима	85	67	82	0,51	0,50	0,1	0,4	1,03
	Весна	81	69	74	0,44	0,39	0,2	0,7	1,45
	Лето	81	57	83	0,41	0,41	-0,3	1,4	0,92
	Осень	85	67	84	0,53	0,52	0,1	0,6	1,02
	Год	83	65	81	0,47	0,46	0,0	0,7	1,08
36 ч	Зима	86	66	86	0,53	0,54	0,2	0,4	0,95
	Весна	84	68	82	0,50	0,47	0,2	0,6	1,19
	Лето	74	71	69	0,42	0,39	0,2	1,8	1,28
	Осень	86	70	86	0,57	0,57	0,2	0,7	0,97
	Год	83	69	81	0,51	0,50	0,2	0,8	1,08
48 ч	Зима	84	63	81	0,45	0,45	0,2	0,4	1,03
	Весна	79	68	72	0,42	0,36	0,3	0,8	1,52
	Лето	77	57	77	0,35	0,35	-0,1	1,6	1,05
	Осень	82	67	82	0,50	0,49	0,2	0,8	1,06
	Год	81	64	78	0,43	0,41	0,1	0,9	1,14
60 ч	Зима	83	61	82	0,44	0,45	0,2	0,5	0,92
	Весна	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	74	65	71	0,37	0,36	0,3	1,5	1,11
	Осень	82	68	82	0,51	0,51	0,2	0,8	1,01
	Год	82	65	82	0,48	0,48	0,2	0,7	0,97
72 ч	Зима	81	60	78	0,39	0,39	0,2	0,6	1,01
	Весна	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	76	60	80	0,41	0,40	0,1	1,6	1,02
	Осень	79	65	77	0,43	0,43	0,4	1,0	1,06
	Год	80	63	78	0,42	0,41	0,3	0,8	1,04

Предупрежденность класса «без осадков» колеблется в пределах от 90 % (зимой, заблаговременность 12 ч) до 69 % (летом, заблаговременность 36 ч). Среднегодовая предупрежденность составляет 87, 81, 81, 78, 82, 78 % соответственно.

Оправдываемость прогноза наличия осадков изменяется от 79 % (летом, заблаговременность 12 ч) до 45 % (весной, заблаговременность 48 ч). Среднегодовая оправдываемость прогнозов в классе осадков составляет 69, 60, 63, 56, 67, 61 % по заблаговременностям 12, 24, 36, 48, 60, 72 ч соответственно. Оправдываемость прогноза отсутствия осадков составляет от 88 % (весной, заблаговременность 12 ч) до 76% (летом, заблаговременность 60 ч). Среднегодовая оправдываемость прогноза отсутствия осадков составляет 84, 84, 84, 83, 80 и 79 % по заблаговременностям соответственно.

Критерий Пирси–Обухова изменяется в пределах от 0,57 (осень, заблаговременность 36 ч) до 0,35 (летом, заблаговременность 48 ч). Среднегодовые значения составляют 0,51; 0,47; 0,51; 0,43; 0,48 и 0,42 по заблаговременностям соответственно.

Данные о проценте не предсказанных (РС) и «лишних» (ЛТ) фактах осадков представлены в левой части табл. 9. Среднегодовые значения не предсказанных осадков составляют от 10 до 13 %, «лишних» осадков – от 9 до 15 %.

В табл. 10 представлено распределение средней абсолютной ошибки прогноза по классам и градациям. Колонка $E_{N_{11}}$ показывает величину средней абсолютной ошибки прогноза количества осадков в выборке «осадки наблюдались и прогнозировались», колонка $E_{N_{21}}$ показывает величину средней абсолютной ошибки в выборке пропущенных осадков, колонка $E_{N_{12}}$ показывает среднюю абсолютную ошибку прогноза в выборке «лишних» осадков. Следующие четыре колонки представляют распределение (%) ошибок прогноза по градациям: соответственно менее 3 мм, от 3 до 5 мм, от 5 до 10 мм и более 10 мм.

Как видно из табл. 10, ошибки менее 3 мм составляют от 100 % (зимой, заблаговременность 12 ч) до 83 % (летом, заблаговременность 36 ч). Все характеристики качества убывают с заблаговременностью прогноза и имеют сезонный ход.

Таблица 10

Распределение средней абсолютной ошибки по классам и градациям
 E (мм) и P (%), осредненных по 333 пунктам Дальнего Востока России,
 по модели WRF-ARW «Хаб-15»

Заблаговременность	Период	Характеристики						
		E _{N11}	E _{N21}	E _{N12}	P≤3	3<P≤5	5<P≤10	P>10
12 ч	Зима	0,5	0,2	0,4	100	—	—	—
	Весна	1,5	0,5	0,8	97	2	1	—
	Лето	3,4	1,6	1,6	87	6	5	2
	Осень	0,9	0,3	0,7	99	1	—	—
	Год	1,6	0,6	1,0	96	2	2	—
24 ч	Зима	1,4	0,4	0,5	97	2	1	—
	Весна	2,3	0,9	0,9	94	3	2	1
	Лето	4,5	2,3	2,0	88	4	4	3
	Осень	2,1	0,9	1,1	95	3	2	—
	Год	2,4	1,2	1,0	94	3	2	1
36 ч	Зима	1,5	0,3	0,6	96	2	2	—
	Весна	2,4	0,7	1	94	3	2	1
	Лето	4,7	1,8	2,1	83	7	6	4
	Осень	2,3	0,6	1,1	94	3	2	1
	Год	2,7	0,8	1,3	92	4	3	1
48 ч	Зима	1,5	0,5	0,7	97	2	1	—
	Весна	2,5	1,2	1,2	93	3	3	1
	Лето	4,9	2,8	2,1	87	4	5	4
	Осень	2,4	0,8	1,4	93	3	3	1
	Год	2,7	1,4	1,3	93	3	3	1
60 ч	Зима	1,7	0,5	0,7	96	2	1	1
	Весна	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	3,2	1,6	2,5	85	7	7	1
	Осень	2,4	0,6	1,2	93	3	3	1
	Год	2,1	0,6	1,0	94	3	2	1
72 ч	Зима	1,8	0,5	0,9	95	2	2	1
	Весна	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	4,6	2,9	2,3	82	8	6	4
	Осень	2,8	0,9	1,4	92	3	3	2
	Год	2,5	0,8	1,2	93	3	3	1

В табл. 11 приводится детализация основных оценочных характеристик качества прогноза осадков по территориям каждого УГМС и административным центрам Дальневосточного региона России.

Данные табл. 11 показывают, что оценочные характеристики неравномерно распределены по территории региона и сезонам года. Наиболее высокие оценки получены для осени, чуть ниже, но вполне сравнимые – для зимы и весны. Наиболее низкие оценки получены летом. В целом за год наиболее высокие значения критерия Пирси–Обухова получены на территории Приморского УГМС (0,62–0,52), чуть ниже – на территории Дальневосточного УГМС (0,57–0,41). Далее идет Сахалинское, Камчатское и Забайкальское УГМС (0,54–0,51 на первые-вторые сутки прогноза и 0,40–0,32 на третьи сутки). Для территорий Якутского, Колымского и Чукотского УГМС среднегодовые значения критерия Пирси–Обухова несколько ниже, но на первые-вторые сутки находятся на уровне прогностической значимости (0,48–0,40).

По административным центрам наиболее высокие значения критерия Пирси–Обухова получены для городов Владивосток, Петропавловск-Камчатский, Хабаровск и Чита.

В целом по территории Дальнего Востока России прогноз посуточных сумм осадков в пунктах может использоваться в качестве вспомогательного материала на первые-вторые сутки.

3. Решение ЦМКП Росгидромета

ЦМКП одобрила работу ФГБУ «ДВНИГМИ» по разработке оперативной технологии расчета прогнозов по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 15 км, расчету прогнозов элементов погоды по данным модели, разработке технологии расчета оценок качества прогнозов. Рассмотрев результаты испытаний методов прогноза элементов погоды в пунктах, расположенных на территории Дальнего Востока России, по модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км («Хаб-15»)

ЦМКП рекомендовала:

– ФГБУ «ДВНИГМИ» довести до сведения УГМС ДВ-региона результаты испытаний и рекомендации по использованию прогнозов в оперативной практике;

Детализация оценочных характеристик качества прогноза полусуточных сумм осадков по модели WRF-ARW «Хаб-15» по УГМС и административным центрам Дальнего Востока России

УГМС	R _н , (%)					Критерий Пирси-Обухова (TSS)				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Дальневосточное	90-80	87-81	87-72	88-79	88-79	0,57-0,42	0,54-0,40	0,44-0,34	0,67-0,42	0,57-0,41
Забайкальское	92-85	89-82	84-70	93-91	89-85	0,52-0,31	0,50-0,25	0,50-0,28	0,56-0,32	0,54-0,33
Якутское	88-84	84-73	83-78	85-78	85-79	0,53-0,35	0,48-0,28	0,41-0,29	0,52-0,33	0,48-0,34
Кольмское	86-83	83-78	88-79	80-72	82-77	0,52-0,41	0,42-0,41	0,51-0,36	0,49-0,35	0,48-0,40
Чукотское	83-80	82-77	80-75	80-78	81-78	0,48-0,41	0,45-0,42	0,47-0,39	0,48-0,36	0,46-0,32
Камчатское	78-70	81-76	81-79	80-75	80-72	0,53-0,36	0,55-0,44	0,48-0,39	0,59-0,39	0,52-0,37
Сахалинское	75-67	80-79	80-75	81-74	78-71	0,57-0,49	0,56-0,47	0,38-0,35	0,58-0,43	0,51-0,46
Приморское	88-83	85-81	81-73	92-81	86-82	0,70-0,59	0,59-0,48	0,45-0,36	0,71-0,56	0,62-0,52
ДВ-регион	90-81	87-79	81-74	90-79	87-80	0,53-0,44	0,51-0,42	0,46-0,35	0,57-0,43	0,51-0,43
Административный центр	R _н , (%)					Критерий Пирси-Обухова (TSS)				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Хабаровск	80-74	88-84	80-69	91-82	82-79	0,54-0,34	0,61-0,34	0,65-0,33	0,85-0,54	0,57-0,50
Чита	92-90	92-81	83-73	97-93	89-86	0,45-0,23	0,44-0,36	0,51-0,22	0,53-0,21	0,50-0,26
Якутск	93-80	87-73	90-78	89-75	87-82	0,49-0,28	0,57-0,27	0,44-0,42	0,44-0,30	0,43-0,30
Магадан	94-84	87-80	82-72	89-79	90-80	0,48-0,44	0,57-0,30	0,51-0,20	0,48-0,35	0,48-0,37
Анадырь	92-81	78-76	83-71	78-67	80-76	0,56-0,42	0,48-0,26	0,43-0,04	0,53-0,25	0,45-0,32
Петропавловск	82-72	90-79	89-80	87-82	84-72	0,70-0,43	0,77-0,52	0,50-0,22	0,75-0,42	0,60-0,53
Южно-Сахалинск	86-68	84-78	83-74	87-80	83-75	0,57-0,49	0,60-0,45	0,33-0,17	0,49-0,36	0,49-0,34
Владивосток	96-87	86-85	79-73	97-89	91-84	0,86-0,50	0,56-0,34	0,27-0,07	0,71-0,79	0,60-0,47

– УГМС ДВ-региона принять за основу рекомендуемые ФГБУ «ДВНИГМИ» и Техническим советом Дальневосточного УГМС статусы внедрения прогнозов элементов погоды по разработанной технологии на базе модели WRF-ARW;

– авторам продолжить работу по совершенствованию технологии прогноза элементов и явлений погоды на территории Дальнего Востока России с учетом физико-географических и климатических особенностей.

Список литературы

1. РД 52.27.284–91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – С. 31–40.

2. РД 52.27.724-2009. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. – М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2009.

3. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Краткосрочный численный прогноз погоды высокого пространственного разрешения по Владивостоку на базе модели WRF-ARW // Вестник ДВО РАН. – 2014. – № 5. – С. 48–57.

4 Skamarock W., Klemp J. A Time-split Nonhydrostatic Atmospheric Model for Weather Research and Forecasting Applications // J. Comp. Phys. – 2008. – Vol. 227 (7). – P. 3465–3485.

5. WRF–ARW User’s Guide v. 3.4. – Boulder: NCAR, 2013. – 384 p. – Режим доступа: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.4/ARWUsersGuideV3.4.pdf (Дата обращения: 01.09.2015).

*Е.Д. Астахова, А.Ю. Бундель, А.Н. Багров, И.А. Розинкина,
Т.Я. Пономарева, И.В. Рузанова, В.И. Цветков*

СИСТЕМА АНСАМБЛЕВОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПРОГНОЗА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ ДО 240 ЧАСОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Введение

Прогнозирование состояния атмосферы с использованием ансамблевого подхода является перспективным методом численного моделирования, активно развиваемым во всем мире. С помощью ансамблевых прогнозов можно не только более устойчиво и правильно (по сравнению с отдельными детерминированными прогнозами) описать будущую эволюцию во времени большинства метеорологических переменных, но и обеспечить пользователя столь необходимой ему информацией о достоверности предоставляемых ему прогностических данных. Практически все ведущие метеорологические центры имеют системы ансамблевого прогноза – глобальные и/или региональные [14, 17–19]. Оперативный выпуск ансамблевых прогнозов является одним из требований, предъявляемых к мировым метеорологическим центрам.

В 2010–2014 гг. в ФГБУ «Гидрометцентр России» была создана и апробирована в квазиоперативном режиме на суперкомпьютерной технике Система глобальных кратко- и среднесрочных Ансамблевых Прогнозов (САП) на основе использования отечественных глобальных прогностических моделей.

Краткое описание системы ансамблевого прогноза

Система ансамблевого прогноза основана на использовании совокупности (ансамбля) прогнозов, стартующих со слегка различаю-

щихся начальных данных о состоянии атмосферы. Используются невозмущенные начальные данные (результаты объективного анализа ФБГУ «Гидрометцентр России») и возмущенные начальные данные, отличия которых от результатов объективного анализа сопоставимы с его ошибками. Для подготовки возмущенных начальных данных используется бридинг-метод [20]. Этот метод, называемый еще методом выращивания наиболее быстро растущих мод, является наиболее простым из всех разработанных в настоящее время и требует наименьших затрат компьютерных ресурсов. Величина возмущений модифицируется каждые 12 часов, при этом их норма (в качестве которой используется полная энергия возмущений) поддерживается постоянной. Более подробно формирование возмущенных начальных данных описано в [2, 3].

В качестве основной модели в системе ансамблевого прогноза Гидрометцентра России использована спектральная модель атмосферы Гидрометцентра России с разрешением 169 гармоник и 31 уровень по вертикали [7, 11]. Пре- и постпроцессинг модели оперативной технологии среднесрочного прогноза [9] модифицированы для применения в системе ансамблевых прогнозов.

Ансамбль состоит из 14 прогнозов: прогноза по модели T169L31 по невозмущенным начальным данным (контрольный или невозмущенный прогноз), двенадцати прогнозов по модели T169L31 по возмущенным начальным данным (возмущенные прогнозы) и прогноза по невозмущенным начальным данным по полулагранжевой модели ПЛАВ-2008 Гидрометцентра России и ИВМ РАН [10]. Разрешение обеих использованных моделей сопоставимо – около 70 км по горизонтали, 31 и 28 уровней по вертикали соответственно. В настоящее время в ансамблевой системе среднесрочного прогноза Гидрометцентра России все реализации используются с одинаковыми весами. Прогнозы рассчитываются в режиме реального времени для заблаговременностей до 10 суток по сроку 12 ч ВСВ. Результаты архивируются с шагом 6 часов по заблаговременности. Ежедневно выпускается 10-суточный прогноз по глобусу по сроку 12 ч ВСВ.

Выходная продукция САП записывается в базу данных NEPS ФБГУ «Гидрометцентр России». База содержит все основные метеорологические поля, передаваемые в рамках международного обмена

центрами, выпускающими ансамблевые прогнозы, на порталы проекта TIGGE/THORPEX.

Для агрегации и удобного представления результатов прогнозирования разработана система ансамблевого постпроцессинга, выполняющая расчеты различных статистических характеристик (среднее по ансамблю, разброс в ансамбле, вероятности событий и т. д.). Подготовленные вероятностные характеристики архивируются в общедоступных базах данных HEPS и PEPS ФГБУ «Гидрометцентр России».

Создана специальная автоматизированная технология отображения результатов ансамблевого моделирования в виде ансамблевых метеограмм и веерных диаграмм для отдельных пунктов, а также карт «спагетти» для таких элементов, как осадки, облачность, температура и т. п. В настоящее время ансамблевые метеограммы регулярно размещаются на сайтах Гидрометцентра России (<http://www.meteoinfo.ru/glb-ens-ffc>) и проекта ВМО SWFDP-CA (<http://swfdp-ca.meteoinfo.ru>). Карты «спагетти» представлены на сайте проекта ВМО SWFDP-CA. В исследовательском режиме рекомендуется визуализировать продукцию САП посредством графического пакета «Изограф» [1].

Для оценки качества ансамблевых прогнозов была разработана и внедрена специальная система верификации [5, 6, 12], которая позволяет рассчитывать оценки вероятностных прогнозов в соответствии с требованиями Ведущего центра ВМО по верификации ансамблевых прогнозов [13].

В целом система ансамблевого прогнозирования – большой комплекс, реализованный в операционной среде LINUX и включающий в себя программы на языке Фортран, управляющие сценарии на Korn Shell, сценарии на языке сценариев пакета GRADS, базы данных. Она состоит из множества задач, выполняемых последовательно или параллельно как на внешнем сервере (front-end), так и на суперкомпьютере (задачи, требующие большого объема вычислений, с помощью системы очередей PBS отправляются на суперкомпьютер). Ниже представлен список задач ансамблевой системы прогноза:

- прогноз по спектральной модели по сроку 12 ч ВСВ на 240 часов;
- ансамблевый постпроцессинг: расчет полей средних и разброса по ансамблю, прогностических вероятностей, архивация результатов;

- прогноз по спектральной модели по сроку 00 ч ВСВ на 12 часов;
- копирование информации о результатах прогноза по модели ПЛАВ-2008 из базы данных LAG1 в базу данных NEPS;
- проверка кодов завершения задачи прогноза за срок 12 ч и 00 ч ВСВ;
- подготовка маски «наблюдалось / не наблюдалось явление» по результатам объективного анализа для расчета вероятностных ошибок температуры, высоты поверхности геопотенциала, давления на уровне моря, скорости ветра;
- подготовка ансамблевых метеограмм и веерных диаграмм;
- подготовка карт «спагетти»;
- подготовка маски «наблюдалось / не наблюдалось явление» по результатам наблюдений для осадков;
- расчет и архивация среднего разброса по регионам;
- расчет количеств попаданий и ложных тревог для заданного списка событий (для последующего расчета вероятностных оценок);
- расчет вероятностных оценок;
- расчет детерминистских оценок для контрольного и среднего прогнозов;
- передача информации о вероятностных оценках в Ведущий центр по верификации ансамблевых прогнозов.

Все перечисленные выше задачи запускаются в определенное время суток с помощью демона cron.

Основные задачи – это ансамблевый прогноз по спектральной модели по сроку 12 ч ВСВ на 10 суток и по сроку 00 ч ВСВ на 12 часов. Последняя необходима для модификации возмущений начальных данных, которая должна осуществляться каждые 12 часов.

Расчеты всех прогнозов ансамбля выполняются одновременно и с использованием параллельных вычислений для каждого из прогнозов. Программное обеспечение спектральной модели атмосферы распараллелено с помощью технологии MPI, что позволяет быстро выполнять прогноз на многопроцессорной системе [4]. Кроме того, при функционировании системы в реальном режиме времени одновременно с задачей интегрирования модели атмосферы запускается задача постпроцессинга, обрабатывающая результаты прогноза по мере их готовности, что позволяет раньше предоставлять продукцию пользователям.

Организация оперативных испытаний и их результаты

Оперативные испытания САП проводились в период с декабря 2011 г. по ноябрь 2012 г. для прогнозов по исходным данным за срок 12 ч ВСВ. По рекомендации ЦМКП (решение от 13 декабря 2012 г.) испытания были продолжены до марта 2014 г. Основанием для принятия решения ЦМКП о продлении испытаний была необходимость повышения надежности квазиоперативного счета САП, которая в 2011–2012 гг. была близка к 70 %. За период последующих испытаний с декабря 2012 г. по март 2014 г. надежность счета прогнозов составила 95–96 %. Результаты испытаний 2013–2014 гг. были заслушаны на заседании Ученого Совета Гидрометцентра России 10 апреля 2014 г. и затем на заседании ЦМКП Росгидромета 24 октября 2014 г. Согласно решению ЦМКП, САП была внедрена в оперативную эксплуатацию с 1 января 2015 г. (задержка связана с переносом системы на новый компьютер).

В период испытаний САП функционировала на ЭВМ SGI Altix 4700 (832 2-ядерных процессоров Intel Itanium 9140M, 1664 процессорных ядер, 128 ядер на узел, шина взаимодействия NUMALink, пиковая производительность 11 Тфлопс). На этом компьютере время расчета одной прогностической реализации на 10 суток на 16 процессорах составляло приблизительно 42 мин. При использовании 221 процессора полный прогноз по САП мог быть рассчитан за 45 мин. С учетом задач, необходимых для непрерывной циклической работы САП, в сутки требовалось около 55 мин процессорного времени с использованием 221 процессора. В настоящее время САП реализована на ЭВМ РСК Торнадо (192 8-ядерных процессора Intel E5-2690, 1536 процессорных ядра, шина взаимодействия Infiniband QDR, пиковая производительность 35 Тфлопс). Для подготовки каждого прогноза ансамбля на этом компьютере требуется около 20 мин на 16 процессорных элементах.

Для оценки успешности ансамблевых прогнозов были рассчитаны детерминистские оценки для среднего по ансамблю прогноза высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа, температуры на уровнях 850, 500 и 250 гПа, скорости ветра на уровнях 500 и 250 гПа и давления на уровне моря, соответствующие требованиям ВМО [16], а также вероятностные оценки, соответствующие требованиям ВМО и Ведущего центра по верификации ансамблевых прогнозов [13].

Расчет детерминистских оценок качества среднего по ансамблю прогноза проводился отделом испытаний на сетке $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ по стандартным процедурам, принятым в Гидрометцентре России. При расчете оценок результаты прогноза сопоставлялись с результатами анализа 3D-Var, подготовленного на сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. (В течение испытаний в качестве начальных данных для прогнозов ансамбля по модели T169L31 использовались поля объективного анализа Гидрометцентра России на сетке $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ по методическим и технологическим причинам). Ежедневно рассчитывались следующие детерминистские оценки для среднего по ансамблю прогноза и контрольных прогнозов: коэффициент корреляции тенденций, коэффициент корреляции аномалий, средняя квадратическая ошибка, средняя арифметическая ошибка, средняя абсолютная ошибка, относительная ошибка, градиентная ошибка.

Оценки рассчитывались для следующих регионов:

- внетропическая часть Северного полушария ($0-360^\circ$ в. д., $21-88,5^\circ$ с. ш.);
- внетропическая часть Южного полушария ($0-360^\circ$ в. д., $20-90^\circ$ ю. ш.);
- тропики ($0-360^\circ$ в. д., 20° с. ш. – 20° ю. ш.);
- Европа ($0-51^\circ$ в. д., $75-34,5^\circ$ с. ш.);
- Азия ($50-135^\circ$ в. д., $75-40^\circ$ с. ш.);
- Европейская территория России ($25-60^\circ$ в.д., $65 - 47.5^\circ$ с.ш.);
- Западная Сибирь ($60-110^\circ$ в.д., $70-50^\circ$ с.ш.).

Рассматривались результаты прогнозов за 400 дней (с 1 февраля 2013 г. по 7 марта 2014 года).

Анализ детерминистских оценок качества прогнозов показал, что средний по ансамблю прогноз базовых метеорологических полей имеет более высокую успешность по сравнению с детерминистским прогнозом по модели T169L31 при заблаговременности более 3 суток, а при заблаговременности 9–10 суток по большинству анализируемых параметров оказывается лучше, чем наиболее успешный среди других моделей Гидрометцентра России прогноз по модели ПЛАВ-2008 (рис. 1–3).

Вероятностные оценки качества прогнозов рассчитывались с помощью специально разработанного авторами программного обеспечения [6].

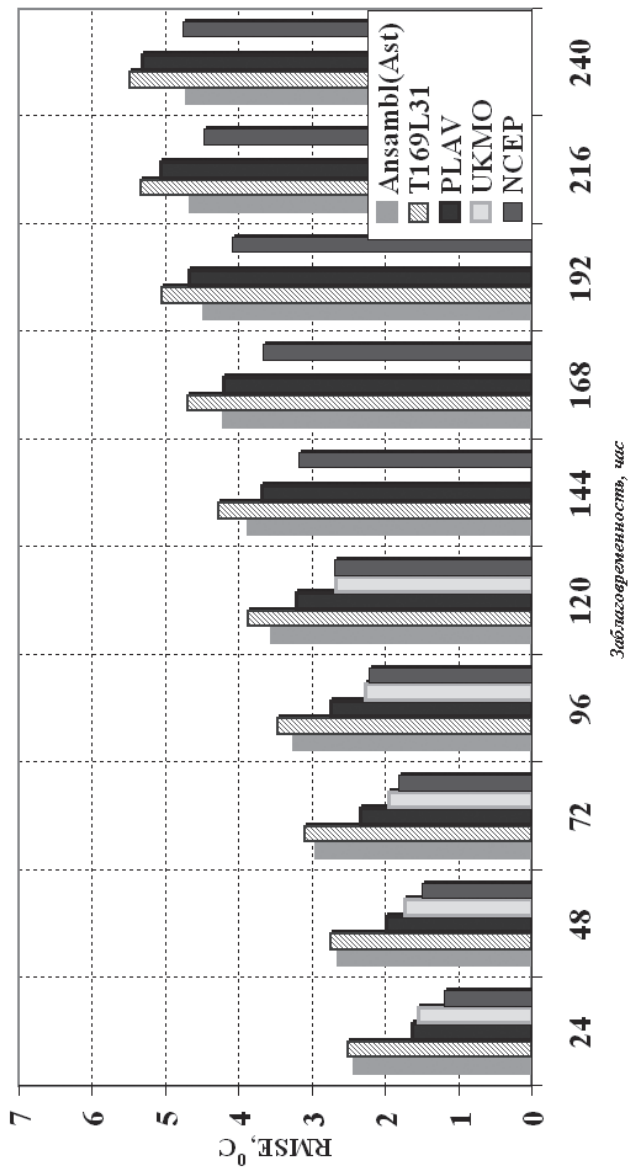


Рис. 1. Среднеквадратическая ошибка прогноза температуры на уровне 850 гПа для региона Европа.

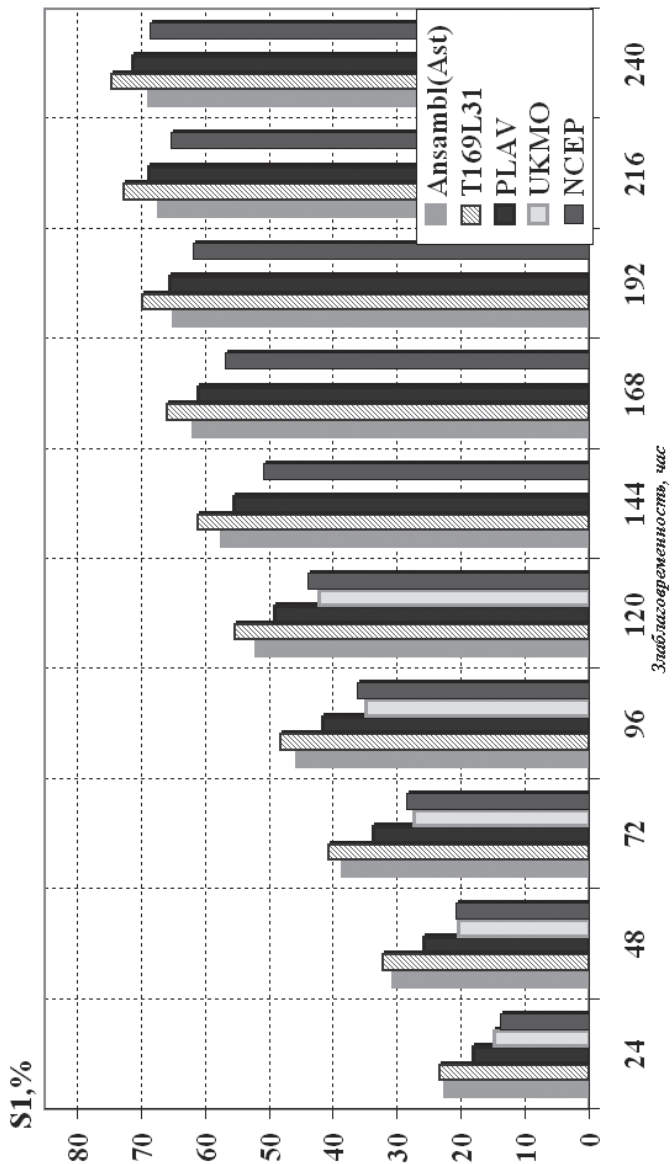


Рис. 2. Градиентная ошибка прогноза геопотенциала на уровне 500 гПа для региона Северное полушарие.

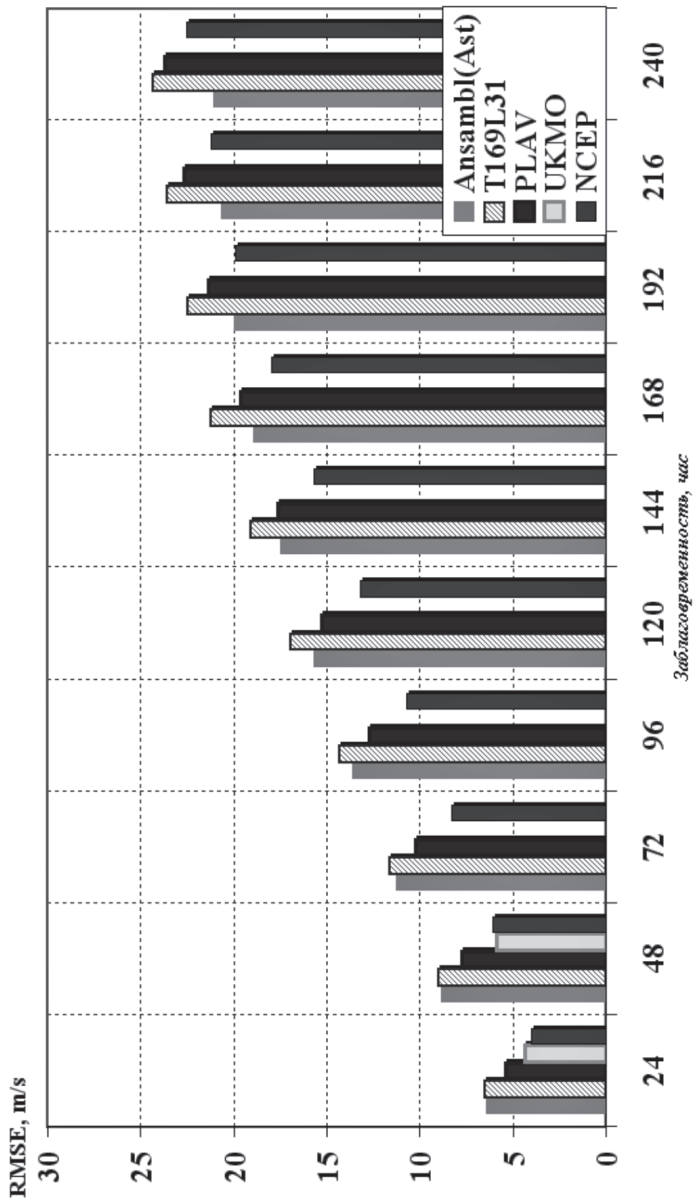


Рис. 3. Среднеквадратическая векторная ошибка прогноза меридиональной скорости ветра на уровне 250 гПа для региона Северное полушарие.

При оценке качества вероятностных прогнозов выбираются некоторые события (обычно это случаи, когда некоторые метеорологические величины оказываются ниже или выше заданных пороговых значений) и для них составляются расширенные таблицы сопряженности, основанные на информации о числе случаев, когда событие наблюдалось / не наблюдалось в действительности и когда оно было предсказано/не предсказано и с какой вероятностью.

В соответствии с рекомендациями Ведущего центра по верификации ансамблевых прогнозов, рассматривались следующие пороговые значения метеоэлементов:

- для аномалий геопотенциала на уровне 500 гПа, температуры на уровне 850 гПа, а также давления на уровне моря: более 1, 1,5, 2 стандартных отклонений и менее –1, –1,5, –2 стандартных отклонений от суточного климата;

- для скорости ветра на уровне 850 гПа: более 10, 15, и 25 м/с;

- для скорости ветра на уровне 10 м: более 10, 15, и 25 м/с;

- для суточных сумм осадков: более 1, 5, 10 и 25 мм.

На основе вероятностной таблицы сопряженности рассчитывались следующие оценки [8, 15, 21]:

- оценка Брайера;

- оценка мастерства Брайера относительно климата по выборке;

- ROC-кривые и площади под ними;

- диаграммы надежности;

- гистограммы частот.

Для расчета аномалий и пороговых значений (см. выше) требуется суточный климат, подготовленный в метеорологическом центре, в котором выполняется прогноз [13, 16]. В связи с отсутствием такого в Гидрометцентре России, в качестве климатологии были использованы данные на сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, любезно предоставленные ансамблевой группой NCEP. Эти данные получены на основе реанализов NCEP за 40 лет и содержат многолетние средние значения необходимых полей для каждого дня года для четырех сроков 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ и соответствующие стандартные отклонения от среднего. (Заметим, что при расчете коэффициента корреляции аномалий для среднего по ансамблю использованы климатические среднемесячные данные, подготовленные в Обнинске, на сетке $5^\circ \times 10^\circ$ и содержащиеся в базе данных SHOT Гидрометцентра России).

Для расчета вероятностных оценок ежедневно рассчитывались так называемые маски – поля с разрешением $1,25^\circ \times 1,25^\circ$, состоящие из значений 1 или 0 в зависимости от того, наблюдалось или не наблюдалось рассматриваемое явление в соответствующем узле сетки. Для температуры, высоты геопотенциала, давления, приведенного к уровню моря, и ветра такие маски готовились на основе данных объективного анализа Гидрометцентра России. Для осадков был разработан специальный алгоритм подготовки маски на основе непосредственно данных наблюдений [6]. Полученные маски записывались в базы данных Гидрометцентра России.

Когда были готовы маски, соответствующие прогнозам всех заблаговременностей (через 14 дней после того, как выпущен прогноз), рассчитывались и архивировались количества попаданий и ложных тревог для заданного списка событий. На основе этих данных двадцатого числа каждого месяца рассчитывались вероятностные оценки за прошедший месяц.

Агрегированные за месяц вероятностные оценки регулярно передавались на сайт Ведущего центра по верификации ансамблевых прогнозов, где они представлялись в графической форме наряду с оценками других мировых центров. Кроме среднемесячных значений также анализировались временные ряды вероятностных оценок за все время испытаний над Северным полушарием. ЦМКП были представлены результаты за 2013–2014 годы.

Анализ полученных вероятностных оценок был выполнен на основе сравнения с результатами ведущих мировых центров, представленными на сайте Ведущего центра по верификации ансамблевых прогнозов. Отмечено удовлетворительное качество вероятностных прогнозов САП: для важнейших метеорологических характеристик (осадки, высоты геопотенциала на уровне 500 гПа, температуры и скорости ветра на уровне 850 гПа, давления на уровне моря) значения вероятностных оценок для глобальной ансамблевой системы среднесрочного прогноза ФГБУ «Гидрометцентр России» занимают промежуточное положение между аналогичными результатами других мировых центров. В качестве иллюстрации приведем таблицу, содержащую площадь под кривой ROC, для двух отдельных месяцев 2014 г. и двух событий: «Аномалия геопотенциала на уровне 500 гПа

больше 1 стандартного отклонения от климата» и «Аномалия давления на уровне моря больше 1 стандартного отклонения от климата». Большие значения площадей под ROC-кривыми соответствуют лучшему качеству вероятностного прогноза. Обычно прогноз считается пригодным для использования, если значения площади под ROC-кривой не менее 0,6.

В таблице и на рис. 4: ECMWF – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), RUMS – Гидрометцентра России, КМА – Корейская метеорологическая администрация, CPTEC – бразильский Центр прогнозирования погоды и климатических исследований.

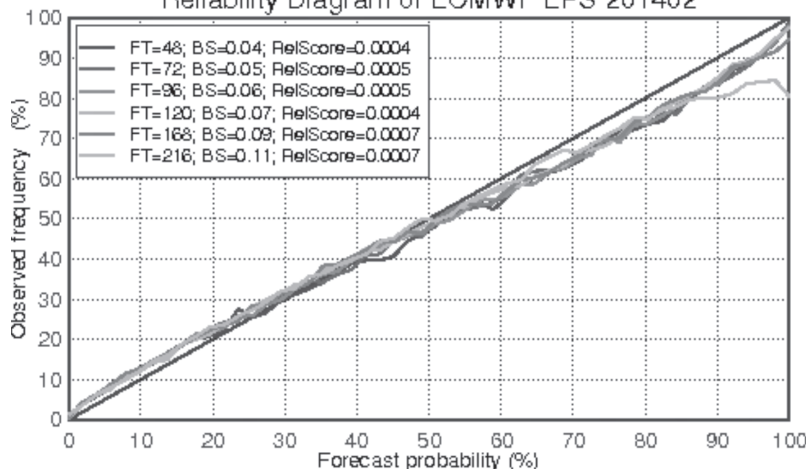
Таблица

Площадь под ROC-кривой по результатам ансамблевых прогнозов различных центров

Событие	Аномалия H500 > 1 std, январь 2014 г.					Аномалия pmsl > 1 std, март 2014 г.				
	48	72	96	120	216	48	72	96	120	216
Заблаговременность, ч	48	72	96	120	216	48	72	96	120	216
ECMWF	1,00	0,99	0,98	0,96	0,88	0,99	0,99	0,98	0,97	0,85
RUMS	0,94	0,89	0,65	0,81	0,64	0,9	0,87	0,84	0,8	0,69
КМА	0,99	0,97	0,96	0,94	0,84	0,99	0,98	0,96	0,94	0,80
CPTEC	0,89	0,83	0,78	0,73	0,69	0,83	0,78	0,71	0,69	0,68

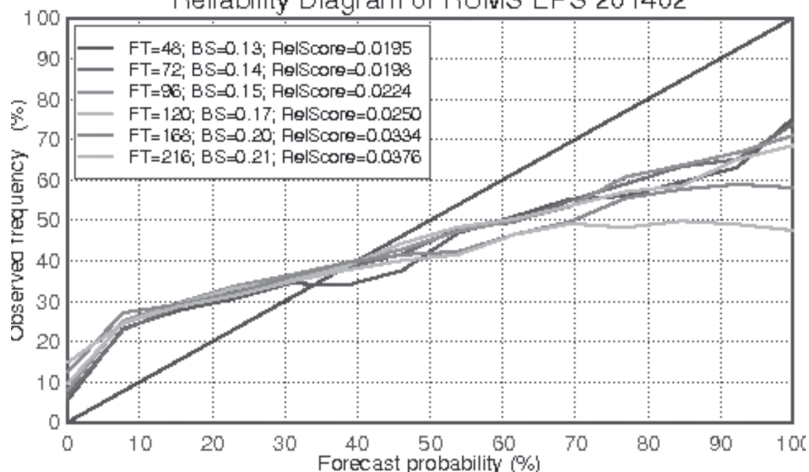
На рис. 4 представлены диаграммы надежности для прогнозов разных центров для события «Аномалия температуры на уровне 850 гПа меньше 1 стандартного отклонения от климата» для февраля 2014 года. В случае идеального прогноза предсказанная частота события и реально наблюдавшаяся частота события совпадают, таким образом, кривые идеальной диаграммы надежности лежат на диагонали, изображенной на рисунке прямой линией. Видно, что наиболее близок к идеалу прогноз ЕЦСПП, а система Гидрометцентра России показывает результаты существенно худшие, чем ЕЦСПП, но лучшие, чем CPTEC. На рисунке более светлые кривые соответствуют большим заблаговременностям прогноза.

T850 anomaly greater than 1sd over NH grids
Reliability Diagram of ECMWF EPS 201402



4a

T850 anomaly greater than 1sd over NH grids
Reliability Diagram of RUMS EPS 201402



46

75

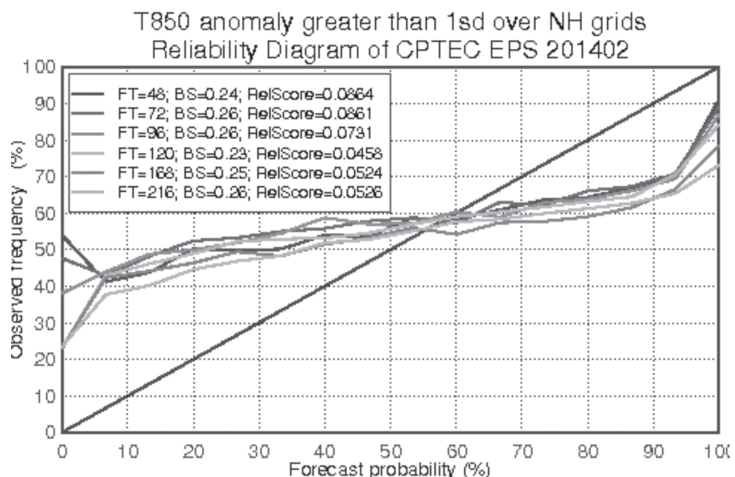
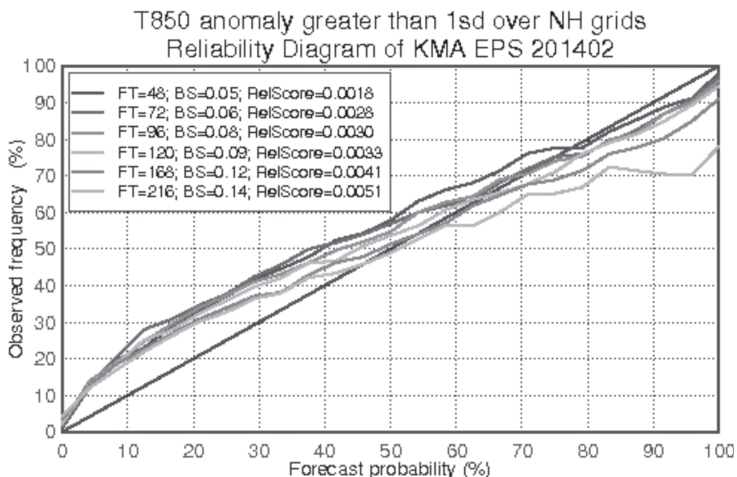


Рис. 4. Диаграммы надежности для ансамблевых прогнозов различных центров – ЕЦСПП (а), Гидрометцентр России (б), Корейская метеорологическая администрация (в), бразильский Центр прогнозирования погоды и климатических исследований (г) – для события Аномалия T850 < 1std. Северное полушарие. Февраль 2014 г.

Заключение

На своем заседании 24 октября 2014 г. ЦМКП одобрила работу ФГБУ «Гидрометцентр России» по разработке и испытанию новой технологии глобального среднесрочного ансамблевого прогноза и отметила важность и актуальность реализации в Росгидромете технологии глобального среднесрочного ансамблевого прогнозирования для выполнения функций ММЦ «Москва» и международных обязательств Российской Федерации.

На основе анализа результатов оперативных испытаний системы ансамблевых прогнозов на краткие и средние сроки (САП) было принято следующее решение:

– рекомендовать к внедрению продукцию САП в виде средних по ансамблю прогнозов полей давления на уровне моря и ключевых метеопараметров (температуры, геопотенциала, скорости ветра) в тропосфере и нижней стратосфере, а также вероятностных характеристик прогнозов осадков, геопотенциала и температуры в качестве вспомогательного метода для составления кратко- и среднесрочных прогнозов погоды;

– обеспечить размещение продукции САП и методических материалов, разъясняющих особенности ее использования, на сайте ФГБУ «Гидрометцентр России»;

– рекомендовать авторам продолжить развитие САП, в частности, путем перевода САП на результаты нового анализа ФГБУ «Гидрометцентр России» 3D-Vар на сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$;

– ФГБУ «Гидрометцентр России» организовать обучение специалистов-синоптиков по использованию продукции ансамблевых прогнозов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела систем информационного обеспечения Гидрометцентра России, а также руководству ГВЦ Росгидромета за поддержку работы.

Список литературы

1. *Алферов Ю.В.* Автоматизированная графическая система для визуализации результатов численных прогнозов // Труды Гидрометцентра России. – 2003. – Вып. 338. – С. 119–124.

2. *Астахова Е.Д.* Построение ансамблей начальных полей для системы кратко- и среднесрочного ансамблевого прогнозирования погоды // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 98–117.

3. *Астахова Е.Д.* Ансамблевый среднесрочный прогноз погоды: реализация технологии на современной компьютерной базе // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 38–52.

4. *Астахова Е.Д., Алферов Ю.В.* Опыт использования параллельных алгоритмов в спектральной модели среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Т. 8. – С. 138–146.

5. *Бундель А.Ю.* Оценка качества среднесрочных прогнозов количества осадков по данным ансамблевого интегрирования с помощью спектральной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 134–143.

6. *Бундель А.Ю., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Семенов А.Е., Алферов Д.Ю.* Верификация кратко- и среднесрочных прогнозов осадков на основе системы ансамблевого моделирования Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 10. – С. 20–34.

7. *Курбаткин Г.П., Астахова Е.Д., Крупчатников В.Н., Рябинин В.Э., Сальник В.А., Смирнов В.Д., Фролов А.В.* Модель среднесрочного прогноза погоды // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 194. – Вып. 2.

8. *Муравьев А.В.* Стандартизованная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 264–288.

9. *Розинкина И.А., Алферов Ю.В., Астахова Е.Д., Пономарева Т.Я., Цветков В.И.* Глобальная оперативная спектральная модель Гидрометцентра России: основные характеристики и особенности использования в технологиях кратко- и среднесрочного прогноза // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 160–192.

10. *Толстых М.А., Богословский Н.Н., Шляева А.В., Юрова А.Ю.* Полулагранжева модель атмосферы PLAV // 80 лет Гидрометцентру России. – М.: Триада ЛТД, 2010. – С. 193–216.

11. *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. 5–20.

12. *Astakhova E.D., Bundel A.Yu.* Medium-Range Ensemble Prediction at the Hydrometcenter of Russia // WMO/WGNE. Research Activities in atmospheric and oceanic modeling. – 2009. – Rep. No. 39. – P. 6-03 – 6-04.

13. Guideline on the exchange and use of EPS verification results. – 2012. Available at <http://epsv.kishou.go.jp/EPSv/guideline.pdf>

14. *Houtekamer P.L., Lefaiivre L., Derome J., Ritchie H., Mitchell H.L.* A system simulation approach to ensemble prediction // Mon. Wea. Rev. – 1996. – Vol. 124. – P. 1225–1242.

15. *Jolliffe I.T., Stephenson D.B.* Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. – West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2003. – 240 p.
16. Manual on the global data-processing system // WMO-No. 485. – 2010. Available at http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/documents/485_Vol_I_en_colour.pdf
17. *Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., Petroliagis T.* The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 1996. – Vol. 122. – P. 73–119.
18. *Montani A., Cesari D., Marsigli C., Paccagnella T.* Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges // Tellus A. – 2011. – Vol. 63. – P. 605–624. – DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00499.
19. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1993. – Vol. 74. – P. 2317 – 2330.
20. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method // Mon. Wea. Rev. – 1997. – Vol. 125. – P. 3297–3319.
21. *Wilks D.S.* Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. – San Diego: Academic Press, 2005. – 627 p.

*Р.М. Вильфанд, П.П. Васильев, В.И. Лукьянов,
А.Д. Голубев, Е.Л. Васильева, С.Л. Мищенко*

МЕТОД ПРОГНОЗА ОПАСНОГО ПРИРОДНОГО ЯВЛЕНИЯ – АНОМАЛЬНО ХОЛОДНОЙ ПОГОДЫ НА 48–144 ЧАСА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ИСПЫТАНИЯ

В Руководящем документе Росгидромета [1] аномально холодная (аномально жаркая) погода отнесена к опасным природным явлениям (ОЯ) и определена как сохранение над данной территорией в течение пяти суток и более значений среднесуточной температуры воздуха ниже (выше) климатической нормы на 7 °С и более. Необходимо отметить, что впервые в прогностической практике гидрометобеспечения речь идет о такой большой заблаговременности прогноза ОЯ, как 48–144 часа.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработана, реализована на комплексе ЭВМ и в последние годы используется в оперативной практике прогностическая технология расчета элементов погоды (РЭП) численной интерпретации гидродинамических моделей атмосферы (ГДМА) для среднесрочного прогноза экстремальной температуры воздуха у поверхности Земли с детализацией по дням [2]. В некоторый момент времени и в данной точке пространства значение температуры воздуха можно представить в виде суммы климатической нормы и ее аномалии. Исходя из многолетнего опыта обеспечения прогнозами температуры воздуха различных отраслей экономики, в том числе связанных с энергопотреблением, мы видим большую эффективность в использовании прогнозов аномалий температур воздуха наряду с использованием прогнозов абсолютных значений температуры воздуха.

Созданная в Гидрометцентре России и изложенная в данной статье технология составления предупреждения об ОЯ – аномально холодной погоде в холодные (отопительные) периоды реализуется следующим образом. В период с октября по апрель в Гидрометцентре России составляется прогноз аномалий средней суточной температуры воздуха и минимальной температуры воздуха ночью по субъектам Российской Федерации. При наличии в прогнозе аномалии средней суточной температуры (ниже минус 7 °С в течение пяти суток и более [1]) составляется предупреждение для Правительственной комиссии по обеспечению безопасности энергоснабжения [3]. Основой для данного прогноза ОЯ (как уже отмечалось выше) являются прогностические материалы, подготовленные по схеме РЭП [2].

Первый этап составления прогноза опасного природного явления для территории Российской Федерации, включая пересылку результатов прогнозисту (синоптику) для окончательной коррекции, полностью автоматизирован и осуществляется следующим образом. После расчета по прогностической технологии РЭП [2] прогноза температуры воздуха (по оперативным данным) осуществляется численная обработка прогностических метеорологических полей с целью ранжирования районов с сильными отрицательными аномалиями. Осуществляется автоматическое составление соответствующих текущих каталогов для систематизации полученных значений. Для удобства использования прогнозистами-синоптиками данные визуализируются в виде текстовых таблиц и карт изолиний. Эти материалы пересылаются на ПЭВМ в отдел краткосрочных прогнозов погоды ФГБУ «Гидрометцентр России» для дальнейшей коррекции.

Прогнозист анализирует синоптическую обстановку на территории тех субъектов России, которые по рассчитанным значениям аномалии температуры воздуха входят в критерии потенциально опасных для обеспечения безопасности энергоснабжения. При этом анализируется весь комплекс аэросиноптических материалов, доступных на данный момент времени и с максимальной заблаговременностью. Проводится анализ прошедшей погоды, где основное внимание уделяется значениям минимальной температуры воздуха. При необходимости прогнозист вносит изменения в выходные данные расчетов по схеме РЭП и формирует список субъектов

Российской Федерации, на территории которых ожидается аномально холодная погода.

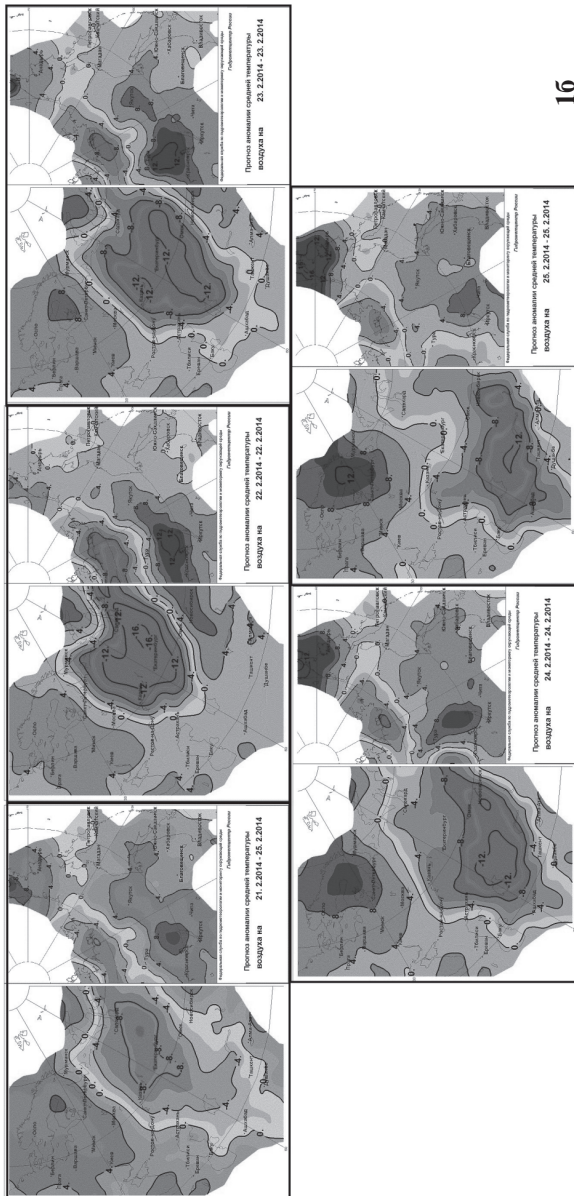
Работу синоптика по выявлению и прогнозу зон с аномалиями температуры воздуха рассмотрим на примере прогноза экстремально низких температур.

Используются следующие данные наблюдений и прогнозов:

1. Карта синоптического анализа за 00 ч ВСВ текущих суток.
2. Прогностические карты H500 и P0 по модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) на 24–168 часов.
3. Карты максимальных значений температуры по территории России за предшествующий день и минимальных температур за прошедшую ночь.
4. Прогностические материалы, полученные по схеме РЭП:
 - 4.1. Прогностические карты по территории России ежедневной аномалии температуры воздуха на 48–144 ч (пять карт, рис. 1);
 - 4.2. Прогностическая карта по территории России аномалий температуры на пентаду (рис. 2);
 - 4.3. Прогностическая карта по территории России аномалий температуры на декаду с нулевой заблаговременностью;
 - 4.4. Таблица прогноза средней пентадной температуры воздуха и ее аномалии по 83 субъектам Российской Федерации (табл. 1).
 - 4.5. Таблица прогноза экстремально низкой температуры воздуха по пунктам (содержащая соответствующие нормы температуры, индекс станции, значения ожидаемой температуры воздуха и ее аномалии, преобладающей температуры воздуха в данном регионе) по 83 субъектам Российской Федерации (табл. 2).

Последовательность работы синоптика

На основе анализа фактической синоптической обстановки с использованием карт синоптического анализа, карт фактических значений максимальной и минимальной температуры за ближайшие день и ночь, прогностических карт ЕЦСПП на 24–168 ч (материалы 1, 2, 3) выявляются синоптические процессы и территории, где существует угроза вторжения холодных воздушных масс и дальнейшего понижения температуры за счет радиационного выхолаживания. Далее синоптический анализ подкрепляется анализом расчетных данных по схеме РЭП (материалы 4.1–4.5).



16

Рис. 1. Ежедневные фактические (1а) и прогностические (1б) аномалии средних температур воздуха по территории Российской Федерации с 21 по 25 февраля 2014 г.

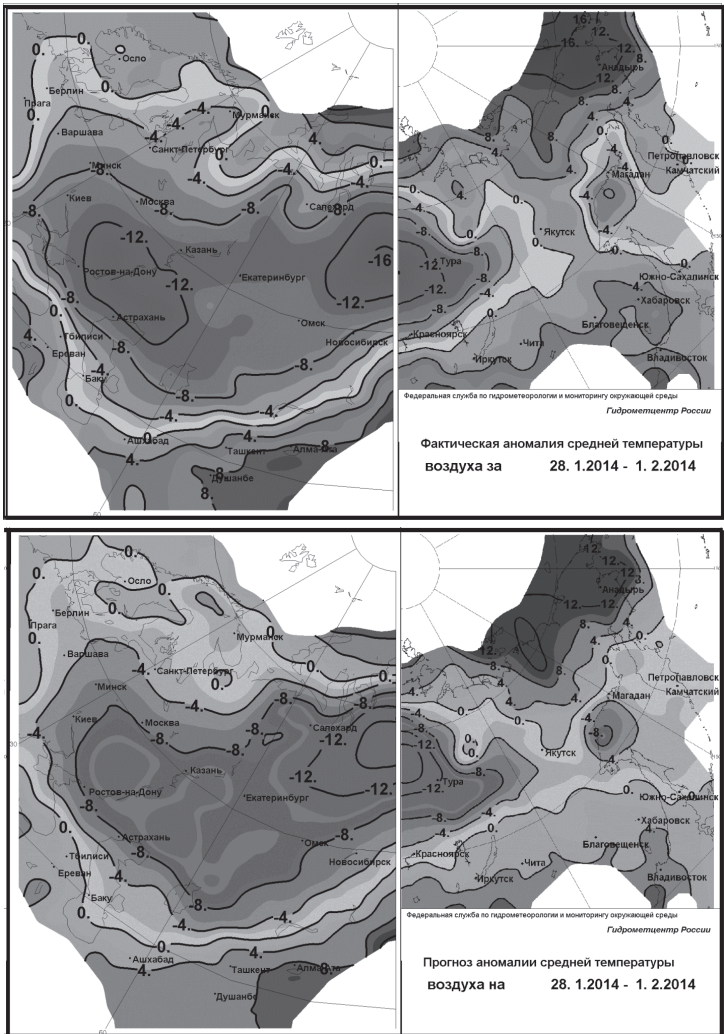


Рис. 2. Фактическая и прогностическая аномалии средних температур воздуха по территории Российской Федерации, осредненные за пентаду с 28 января по 1 февраля 2014 г.

**Прогноз средней температуры воздуха и ее аномалии на пентаду
8–12 ноября 2015 г. (данные приведены для административных центров
субъектов Российской Федерации)**

№ п/п	Субъект федерации	Средняя температура, °С	Аномалия температуры, °С	Норма, °С
1	Архангельская область	–8 ... –6	–3,6	–3,5
2	Ненецкий А.О.	–15 ... –13	–4,9	–8,6
3	Мурманская область	–2 ... 0	+3,0	–4,1
4	Республика Карелия	0 ... 2	+2,0	–1,5
5	Вологодская область	–2 ... 0	+0,9	–2,3
6	Республика Коми	–13 ... –11	–6,7	–5,3
7	Ленинградская область	4 ... 6	+3,6	0,9
8	Новгородская область	2 ... 4	+3,2	0,1
9	Псковская область	4 ... 6	+4,0	0,9
10	Калининградская область	8 ... 10	+5,0	4,0
...	...			
83				

Синоптику необходимо решить две задачи:

1. Выявить наличие зон экстремально низких температур, где прогностические значения (материалы 4.5) минимальных температур ниже порога, определенного для данных территорий как критерий ОЯ (сильный мороз). При выявлении таких зон разрабатывается штормовое предупреждение независимо от продолжительности периода.

2. Определить территории (субъекты России), где фактические и ожидаемые значения среднесуточной температуры воздуха в течение пяти суток и более ниже климатической нормы на 7 °С и более.

Анализ производится в следующей последовательности:

- по прогностической карте (материалы 4.2) выявляются регионы, где аномалия температуры составляет –4 °С и ниже;
- по ежедневным прогностическим картам аномалии температуры воздуха на 48–144 ч (материалы 4.1) по территории России уточняются регионы, где ежесуточные аномалии температуры составляют –6 ... –8 °С и ниже. Определяется направление перемещения таких зон и продолжительность периода низких значений аномалий температуры.

Таблица 2

Прогноз экстремального значения отрицательной аномалии среднесуточной температуры воздуха ΔT (соответствующей минимальной температуры воздуха ночью T_{min}) с указанием индекса пункта, в котором оно наблюдалось, и прогноз преобладающей среднесуточной температуры воздуха по территории субъекта РФ на 8–12 ноября 2015 года

№ п/п	Субъект Федерации	8.11.2015	9.11.2015	10.11.2015	11.11.2015	12.11.2015
		ΔT (T_{min}), индекс и назв. пункта, преобл. Тср.	ΔT (T_{min}), индекс и назв. пункта, преобл. Тср.	ΔT (T_{min}), индекс и назв. пункта, преобл. Тср.	ΔT (T_{min}), индекс и назв. пункта, преобл. Тср.	ΔT (T_{min}), индекс и назв. пункта, преобл. Тср.
1	Архангельская область	-3,5 (-10,1) 22798 Яренск -6 ... -1	-5,6 (-13,0) 22798 Яренск -9 ... -4	-7,1 (-14,1) 22798 Яренск -10 ... -5	-8,9 (-16,5) 22798 Яренск -11 ... -6	-8,1 (-17,1) 22798 Яренск -11 ... -6
2	Ненецкий АО	-3,1 (-13,3) 23207 Коткино -8 ... -3	-5,5 (-15,9) 23207 Коткино -10 ... -5	-7,4 (-18,6) 23207 Коткино -11 ... -6	-7,7 (-18,8) 23207 Коткино -13 ... -8	-8,5 (-19,8) 23207 Коткино -14 ... -9
3	Мурманская область	-1,7 (-5,2) 22133 О. Харлов -4 ... 1	-2,0 (-5,4) 22349 Пялица -4 ... 1	-1,7 (-5,2) 22349 Пялица -4 ... 1	-2,1 (-5,6) 22349 Пялица -4 ... 1	-1,5 (-5,4) 22349 Пялица -5 ... 0
4	Республика Карелия	отрицательная аномалия отсутствует 0 ... 5	отрицательная аномалия отсутствует -1 ... 4	отрицательная аномалия отсутствует -2 ... 3	-0,5 (-4,6) 22738 Куганаволок -3 ... 2	-0,4 (-5,3) 22738 Куганаволок -3 ... 2

Таблица 2 (окончание)

№ п/п	Субъект федерации	8.11.2015	9.11.2015	10.11.2015	11.11.2015	12.11.2015
5	Вологодская область	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>отрицательная аномалия отсутствует -2 ...3</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-3,3 (-8,3) 22981 Великий Устюг -4 ...1</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-4,0 (-9,1) 22981 Великий Устюг -4 ...1</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-5,5 (-11,4) 22981 Великий Устюг -6 ...-1</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-4,5 (-10,9) 22981 Великий Устюг -6 ...-1</p>
6	Республика Коми	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-4,1 (-10,6) 23804 Сыктывкар -11 ...-6</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-6,2 (-14,2) 23701 Весляна -13 ...-8</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-7,9 (-16,3) 23803 Усть-Кулом -16 ...-11</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-9,0 (-17,7) 23701 Весляна -17 ...-12</p>	<p>ΔТ (Tmin), индекс и назв. пункта, преобл. Тер.</p> <p>-9,8 (-20,7) 23411 Мутный Материк -17 ...-12</p>
7	Ленинградская область	<p>отрицательная аномалия отсутствует 1 ...6</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 1 ...6</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 1 ...6</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 1 ...6</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 0 ...5</p>
8	Новгородская область	<p>отрицательная аномалия отсутствует 0 ...5</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 2 ...7</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 1 ...6</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 2 ...7</p>	<p>отрицательная аномалия отсутствует 1 ...6</p>
...	...					
83						

Выписываются регионы, где продолжительность таких ежесуточных аномалий температуры составляет более трех дней (желательно использовать географическое разграничение для больших субъектов Российской Федерации, если прогностические температурные характеристики существенно варьируют по территории) (табл. 3).

Таблица 3

**Прогноз значительных отрицательных температурных аномалий
в субъектах Российской Федерации**

№ п/п	Субъект федерации	Период действия прогноза	Аномалия температуры за прогностический период, °С	Минимальная температура, °С
1	Ямало-Ненецкий автономный округ	12–15 марта	12 ... 7	41 ... 36
2	Таймырский муниципальный район Красноярского края	12–17 марта	12 ... 7	45 ... 40
3	Эвенкийский муниципальный район Красноярского края	13–17 марта	13 ... 8	45 ... 40
4	Туруханский муниципальный район Красноярского края	12–16 марта	12 ... 7	41 ... 36
5	Северные районы Иркутской области	14–17 марта	12 ... 7	41 ... 36
6	Западные районы Республики Саха (Якутия)	12–17 марта	12 ... 7	48 ... 43

По прогностической карте аномалий температуры воздуха по территории России на декаду (материалы 4.5) и анализу синоптической ситуации по гидродинамическим схемам (до 168 часов) оценивается продолжительность периода с аномалией ниже -7°C . В силу объективных оценок прогностических схем, не стоит периодом действия прогноза охватывать более 5 суток. При необходимости можно через 2–3 дня сделать уточнение к данному прогнозу. Используя таблицы прогноза средней пентадной температуры воздуха и ее аномалии по 83 субъектам Российской Федерации (материалы 4.4)

и прогноза экстремально низкой температуры воздуха (по пунктам) по 83 субъектам Российской Федерации (материалы 4.5) с учетом возможной прогностической корректировки заполняются два правых столбца табл. 3; после проверки полученных данных оформляется установленный бланк предупреждения на основании табл. 3. Отправляется информация в адреса членов Правительственного штаба и территориальные Управления Росгидромета, на территории которых располагаются регионы, отмеченные в табл. 3.

Учитывая опыт составления данных прогнозов ОЯ в течение прошедших зимних (отопительных) периодов, следует отметить высокое качество автоматизированных прогнозов по схеме РЭП. Прогнозист в большинстве случаев вносит лишь незначительные изменения в результаты расчетов по данной схеме.

Испытания метода проводились в течение двух холодных сезонов: 2013/2014 и 2014/2015 гг. Рассчитывались оценки оправдываемости для критерия Пирси–Обухова (1), общей оправдываемости (2) и другие (3)–(6) для 28 районов Российской Федерации. В основу списка районов было положено деление, принятое для прогнозов преобладающей температуры воздуха, размещаемых на 4-й странице Ежедневного гидрометеорологического бюллетеня ФГБУ «Гидрометцентр России» (ЕГМБ) с некоторой дополнительной детализацией. Количественные значения характеристик успешности рассчитывались по формулам:

$$\begin{array}{l} \text{Критерий качества} \\ \text{Пирси–Обухова} \end{array} \quad T = n11 / n01 \quad n12 / n02 \quad (01)$$

$$\begin{array}{l} \text{Общая оправдываемость} \end{array} \quad U = (n11 + n22) / n00 \quad (02)$$

$$\begin{array}{l} \text{Оправдываемость} \\ \text{прогноза наличия ОЯ} \end{array} \quad U_1 = n11 / n10 \quad (03)$$

$$\begin{array}{l} \text{Оправдываемость} \\ \text{прогноза отсутствия ОЯ} \end{array} \quad U_0 = n22 / n20 \quad (04)$$

$$\begin{array}{l} \text{Предупрежденность} \\ \text{факта наличия ОЯ} \end{array} \quad \Pi_1 = n11 / n01 \quad (05)$$

$$\begin{array}{l} \text{Предупрежденность} \\ \text{факта отсутствия ОЯ} \end{array} \quad \Pi_0 = n22 / n02 \quad (06)$$

Таблица сопряженности, используемая для расчета характеристик успешности прогнозов (1) – (6) имеет следующий вид:

Прогноз	Наблюдались		Сумма
	ОЯ	нет ОЯ	
ОЯ	n_{11}	n_{12}	n_{10}
нет ОЯ	n_{21}	n_{22}	n_{20}
Сумма	n_{01}	n_{02}	n_{00}

Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Показатели оценки прогнозов в зимние (отопительные) периоды
2013/2014 и 2014/2015 гг. (320 дат, 1335 станций РФ)**

№ п/п	Район РФ	T	U	U_1	U_0	Π_1	Π_0
1	Запад СЗФО	0,39	93,12	86,67	93,44	39,39	99,30
2	Восток СЗФО	0,56	80,62	64,71	88,07	71,74	84,21
3	Север ЦФО	0,29	96,25	100,00	96,19	29,41	100,00
4	Юг ЦФО	0,47	95,94	91,67	96,10	47,83	99,66
5	Север ПФО	0,46	96,56	80,00	97,10	47,06	99,34
6	Юг ПФО	0,44	93,12	100,00	92,74	43,59	100,00
7	ЮФО и Крым	0,71	97,19	90,00	97,67	72,00	99,32
8	СКФО	0,53	97,19	80,00	97,74	53,33	99,34
9	Ямало-Ненецкий АО	0,79	90,62	82,18	94,52	87,37	92,00
10	Ханты-Мансийский АО	0,69	93,75	72,97	96,47	72,97	96,47
11	Юг УФО	0,49	93,75	80,00	94,67	50,00	98,61

Таблица 4 (окончание)

№ п/п	Район РФ	T	U	U ₁	U ₀	Π ₁	Π ₀
12	Таймыр (север СФО)	0,72	90,31	84,00	92,24	76,83	94,96
13	Туруханский и Эвенкийский МР	0,71	92,19	88,14	93,10	74,29	97,20
14	Запад юга СФО	0,80	95,94	80,56	97,89	82,86	97,54
15	Центр юга СФО	0,41	86,88	72,22	88,73	44,83	96,18
16	Восток юга СФО	0,73	91,56	89,86	92,03	75,61	97,06
17	Север Якутии (ДВФО)	0,68	88,44	75,00	92,62	76,00	92,24
18	Юг Якутии (ДВФО)	0,67	95,94	87,50	96,62	67,74	98,96
19	Запад Якутии (ДВФО)	0,47	85,62	59,62	90,67	55,36	92,05
20	Восток Якутии (ДВФО)	0,68	98,12	91,67	98,38	68,75	99,67
21	Центр Якутии (ДВФО)	0,59	86,25	79,71	88,05	64,71	94,04
22	Амурская область (ДВФО)	0,91	98,75	78,57	99,67	91,67	99,03
23	Магаданская область (ДВФО)	0,67	91,25	81,13	93,26	70,49	96,14
24	Чукотка (ДВФО)	0,52	82,19	65,38	87,60	62,96	88,70
25	Камчатский край (ДВФО)	0,68	93,44	76,32	95,74	70,73	96,77
26	Север Хабаровского края (ДВФО)	0,67	90,00	68,42	94,68	73,58	93,26
27	Юг Хабаровского края, Еврейская АО	0,71	96,56	61,11	98,68	73,33	97,70
28	Приморский край (ДВФО)	0,43	97,50	57,14	98,40	44,44	99,04
	Средние	0,60	92,47	79,45	94,40	63,89	96,39

Метод прогноза ОЯ и результаты испытаний (изложенные выше) докладывались на заседаниях Секции метеорологических прогнозов Ученого Совета ФГБУ «Гидрометцентр России» 1 декабря 2015 г. и 3 декабря 2015 г. Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП), которая приняла следующее решение: учитывая представленные результаты оперативных испытаний, внедрить «Метод прогноза опасного природного явления – аномально холодной погоды на 48–144 часа для территории России» (ФГБУ «Гидрометцентр России», Р.М. Вильфанд, П.П. Васильев, В.И. Лукьянов, А.Д. Голубев, Е.Л. Васильева) в качестве основного в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России».

Список литературы

1. РД 52.88.699–2008. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений.

2. Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Васильева Е.Л., Веселова Г.К., Горлач И.А. Среднесрочный прогноз температуры воздуха и возникновения некоторых ОЯ по технологии Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2010. – № 10. – С. 5–14.

3. Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Лукьянов В.И., Голубев А.Д. Методические указания по прогнозу опасного природного явления – аномально холодной (аномально жаркой) погоды на территории России. – М; Обнинск: ОАО ФОП, 2010. – 12 с.

Т.А. Гончарова, В.М. Лебедева, Л.В. Федотова

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ДИНАМИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ В СЕВЕРО-КАВКАЗСКОМ УГМС

В ФГБУ «ВНИИСХМ» в рамках региональной темы была проведена работа по обновлению устаревших динамико-статистических методов оценки условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя по 11 субъектам Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

В основу базовой модели продуктивности посевов сельскохозяйственных культур, используемой в агрометеорологическом прогнозировании, положена модель «погода – урожай» [5, 6]. Структура модели адаптирована к современным уровням урожайности культур, сокращенным объемам оперативной агрометеорологической информации и почвенно-климатическим условиям региона. Динамико-статистические методы прогноза и оценки разработаны на единой методической основе с использованием универсального объема исходной информации. Для каждого субъекта создана модель, настроенная на получение средней урожайности культуры (озимой пшеницы и ярового ячменя) для конкретного года. Начало периода расчета по модели определяется самой ранней средней многолетней датой возобновления вегетации озимой пшеницы и датой появления всходов ярового ячменя, а окончание – средней датой восковой спелости на территории субъекта [4, 8]. Для составления оперативных прогнозов ожидаемой урожайности и валового сбора озимой пшеницы и ярового ячменя в Северо-Кавказском УГМС разработан пользовательский интерфейс, позволяющий в значительной мере упростить работу агрометеоролога-прогнозиста [1, 3].

Результаты испытаний методов прогноза урожайности

Авторские испытания методов прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя по 11 субъектам Южного и Северо-Кавказского федеральных округов проводились в течение трех лет с 2009 по 2011 г., а производственные – в трехлетний период с 2012 по 2014 г. в соответствии с Планом испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов Росгидромета.

В период вегетации прогнозы урожайности озимой пшеницы составляются в два срока: с заблаговременностью два месяца – 21 мая и один месяц – 21 июня, для ярового ячменя – 21 июня и 21 июля соответственно.

В период испытаний оценка качества методов прогноза проводилась в соответствии с Методическими указаниями [7]. Имеющиеся в отделе агрометпрогнозов и агрометеорологии Северо-Кавказского УГМС методики расчета урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя были разработаны в 80–90-е годы прошлого века и уже устарели, поэтому заключение о целесообразности использования разработанных методов для оперативного обслуживания проведено на основании авторских и производственных испытаний путем сравнения результатов, составленных по новым методикам прогнозов, с оправдываемостью инерционного и климатологического прогнозов за этот же период. Инерционным считается прогноз, когда в качестве прогнозируемого значения принимается фактическое значение урожайности культуры в прошлом году, а климатологическим – когда в качестве прогнозируемой величины принимается среднее арифметическое из фактических значений урожайности за последние пять лет. Оправдываемость испытываемых методов должна быть выше оправдываемости инерционного и климатологического прогнозов при одной и той же допустимой ошибке или ошибка метода должна быть наименьшей при одном и том же значении оправдываемости метода.

Критерием оправдываемости прогнозов, в зависимости от заблаговременности составления прогноза, является среднее квадратическое отклонение (σ) фактического ряда урожайности культуры. Для прогноза с двухмесячной заблаговременностью допустимая погрешность составляет $0,8 \sigma$, для месячной заблаговременности – $0,67 \sigma$. Оправдываемость метода – отношение оправдавшихся прогнозов к общему числу составленных прогнозов, выраженное в процентах.

Ошибка метода – среднее арифметическое значение относительных ошибок оправдавшихся прогнозов (в процентах).

Озимая пшеница

Результаты авторских и производственных испытаний динамико-статистического метода прогноза урожайности озимой пшеницы (2009–2014 гг.) с заблаговременностью один и два месяца представлены в табл. 1. Для сравнения в табл. 1 приведены результаты оправдываемости инерционного и климатологического методов прогноза за этот же период.

В первый срок составления прогноза озимой пшеницы с двухмесячной заблаговременностью показатели оправдываемость и ошибка испытываемого метода были выше аналогичных показателей инерционного и климатологического прогнозов в девяти субъектах (82 %): Волгоградской, Астраханской областях, Краснодарском и Ставропольском краях, республиках Калмыкия, Адыгея, Дагестан, Северная Осетия – Алания и Карачаево-Черкесской. При этом допустимое значение σ в зависимости от субъекта изменялось от 3,2 до 6,1 ц/га.

В табл. 2 представлены результаты оправдываемости прогнозов в период производственных испытаний 2012–2014 гг.

Оправдываемость прогноза в конкретном году рассчитывается как $(100 \% - P)$, где P – относительная ошибка прогноза урожайности, % [2]. В период производственных испытаний в первый срок составления прогноза средняя оправдываемость прогноза урожайности озимой пшеницы по территории в 2012 году составила 68 %, а в 2013 и 2014 гг. – 82,3 и 77,6 % соответственно.

Во второй срок составления прогноза озимой пшеницы с месячной заблаговременностью (21 июня) при допустимой погрешности от 2,9 до 5,9 ц/га ($0,67 \sigma$) оправдываемость и относительная ошибка испытываемого метода прогноза в 8 субъектах оказалась выше, чем у инерционного и климатологического методов прогноза. По территории Астраханской, Ростовской областей и Кабардино-Балкарской Республики оправдываемость испытываемого метода оказалась ниже, чем у инерционного и климатологического методов (табл. 1). Средняя оправдываемость прогнозов по территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов за годы производственных испытаний с 2012 по 2014 г. превышала 70 %: 70,4, 82,9 и 78 % соответственно (табл. 2).

**Результаты авторских и производственных испытаний
метода прогноза урожайности озимой пшеницы (2009–2014 гг.)**

Субъект РФ		Метод прогноза					
		динамико-статистический		инерционный		климато-логический	
		Оправдаемость, %	Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %	Оправдаемость, %	Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %	Оправдаемость, %	Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %
1	2	3	4	5	6	7	
Срок составления прогноза – 21 мая							
1	Республика Калмыкия	66,7	3,7	66,7	7,5	66,7	14,3
2	Астраханская область	83,3	10,0	83,3	14,3	83,3	11,0
3	Волгоградская область	66,7	10,1	66,7	14,5	66,7	12,0
4	Краснодарский край	66,7	1,9	50,0	9,3	50,0	2,8
5	Ставропольский край	83,3	7,9	16,7	5,2	50,0	7,4
6	Ростовская область	50,0	4,2	66,7	6,9	83,3	10,2
7	Республика Адыгея	100,0	10,0	50,0	7,0	83,3	6,0
8	Республика Дагестан	66,7	5,2	50,0	3,0	66,7	7,0
9	Кабардино-Балкарская Республика	66,7	5,2	100,0	5,7	83,3	6,3
10	Карачаево-Черкесская Республика	50	5,7	50,0	11,7	33,3	7,5
11	Республика Северная Осетия – Алания	100,0	9,9	66,7	10,0	83,3	4,3

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	
Срок составления прогноза – 21 июня							
1	Республика Калмыкия	66,7	3,3	50,0	7,5	66,7	12,7
2	Астраханская область	83,3	7,1	83,3	14,3	83,3	6,0
3	Волгоградская область	66,7	5,9	33,3	4,3	66,7	8,6
4	Краснодарский край	66,7	3,2	33,3	8,9	50,0	2,8
5	Ставропольский край	83,3	3,7	16,7	5,2	33,3	6,0
6	Ростовская область	50,0	4,3	66,7	6,9	83,3	10,2
7	Республика Адыгея	66,7	5,2	33,3	1,7	66,7	6,6
8	Республика Дагестан	66,7	4,0	50,0	3,0	66,7	5,8
9	Кабардино-Балкарская Республика	66,7	5,0	100,0	5,7	83,3	6,3
10	Карачаево-Черкесская Республика	50,0	3,4	16,7	7,6	33,3	1,7
11	Республика Северная Осетия – Алания	83,3	4,6	50,0	7,2	83,3	5,3

Таблица 2

**Оправдываемость прогнозов урожайности озимой пшеницы
(производственные испытания 2012–2014 гг.)**

Субъект РФ		Оправдываемость прогноза, %		
		2012	2013	2014
Срок составления прогноза – 21 мая				
1	Республика Калмыкия	63,5	98,2	71,7
2	Астраханская область	42,4	90,8	80,5
3	Волгоградская область	54,0	86,6	68,9
4	Краснодарский край	99,6	75,6	66,6
5	Ставропольский край	70,3	92,2	89,4

Таблица 2 (окончание)

Субъект РФ		Оправдываемость прогноза, %		
		2012	2013	2014
6	Ростовская область	68,4	49,6	77,2
8	Республика Дагестан	76,5	70,3	68,3
9	Кабардино-Балкарская Республика	53,6	99,6	87,8
10	Карачаево-Черкесская Республика	59,2	65,0	73,8
11	Республика Северная Осетия – Алания	77,7	93,4	82,8
Среднее		68,1	82,3	77,6
Срок составления прогноза – 21 июня				
1	Республика Калмыкия	63,5	99,5	72,4
2	Астраханская область	45,9	92,8	81,7
3	Волгоградская область	57,8	88,4	67,6
4	Краснодарский край	94,5	73,0	66,9
5	Ставропольский край	76,0	95,9	98,1
6	Ростовская область	72,2	49,6	71,8
7	Республика Адыгея	86,3	83,0	83,0
8	Республика Дагестан	78,0	71,1	67,8
9	Кабардино-Балкарская Республика	57,5	98,0	89,2
10	Карачаево-Черкесская Республика	62,4	64,0	72,0
11	Республика Северная Осетия – Алания	79,8	96,5	87,4
Среднее		70,4	82,9	78,0

Яровой ячмень

Испытания метода прогноза урожайности ярового ячменя по 11 субъектам Южного и Северо-Кавказского федеральных округов

показали, что в первый срок составления прогноза, с заблаговременностью два месяца (21 июня) при допустимой погрешности от 3,2 до 5,4 ц/га оправдываемость испытываемого метода оказалась выше инерционного и климатологического методов по Астраханской, Ростовской областям, Ставропольскому краю, Республике Адыгея и Карачаево-Черкесской Республике. По остальным субъектам показатели качества испытываемого метода оказались несколько ниже, чем инерционного и климатологического методов (табл. 3). При этом средняя оправдываемость прогнозов в период производственных испытаний в 2012 и 2013 гг. была выше 70 %: 70,1 и 72,7 %, а в 2014 г. – несколько ниже: 67,8 % (табл. 4).

Таблица 3

Результаты авторских и производственных испытаний метода прогноза урожайности ярового ячменя (2009–2014 гг.)

Субъект РФ		Метод прогноза					
		динамико-статистический		инерционный		климатологический	
		Оправдываемость, %	Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %	Оправдываемость, %	Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %	Оправдываемость, %	Относительная ошибка оправдавшихся прогнозов, %
1	2	3	4	5	6	7	
Срок составления прогноза – 21 июня							
1	Республика Калмыкия	66,7	9,5	66,7	22,6	100,0	16,1
2	Астраханская область	66,7	9,2	16,7	12,7	50,0	12,1
3	Волгоградская область	50,0	14,6	66,7	26,0	66,7	17,5
4	Краснодарский край	66,7	11,0	66,7	8,6	83,3	5,1

Таблица 3 (окончание)

1		2	3	4	5	6	7
5	Ставропольский край	83,3	7,1	66,7	12,3	83,3	10,1
6	Ростовская область	83,3	11,8	66,7	14,7	83,3	12,6
7	Республика Адыгея	83,3	7,8	50,0	15,9	66,7	6,8
8	Республика Дагестан	50,0	8,1	50,0	5,5	50	2,3
9	Кабардино-Балкарская Республика	100,0	10,7	100,0	6,8	100	8,2
10	Карачаево-Черкесская Республика	66,7	8,0	66,77	8,8	33,3	7,1
11	Республика Северная Осетия – Алания	66,7	14,3	50,0	21,7	83,3	19,2
Срок составления прогноза – 21 июля							
1	Республика Калмыкия	66,7	8,6	50,0	19,1	66,7	13,1
2	Астраханская область	66,7	8,4	16,7	12,7	50,0	12,1
3	Волгоградская область	66,7	9,3	33,3	21,9	50,0	12,7
4	Краснодарский край	83,3	11,6	66,7	8,6	83,3	5,1
5	Ставропольский край	83,3	3,6	50,0	9,8	66,7	7,7
6	Ростовская область	83,3	7,8	66,7	14,7	83,3	9,6
7	Республика Адыгея	66,7	7,2	50,0	15,9	66,7	6,8
8	Республика Дагестан	33,3	1,5	50,0	5,5	50,0	2,3
9	Кабардино-Балкарская Республика	100,0	5,9	100,0	6,8	100,0	8,2
10	Карачаево-Черкесская Республика	66,7	8,7	50,0	5,9	33,3	7,1
11	Республика Северная Осетия – Алания	50,0	7,9	33,3	12,8	66,7	15,6

Таблица 4

**Оправдываемость прогнозов урожайности ярового ячменя
(производственные испытания 2012–2014 гг.)**

Субъект РФ		Оправдываемость прогноза, %		
		2012	2013	2014
Срок составления прогноза – 21 июня				
1	Республика Калмыкия	41,4	86,5	57,8
2	Астраханская область	82,4	58,1	72,0
3	Волгоградская область	70,2	65,4	47,0
4	Краснодарский край	87,9	78,1	69,4
5	Ставропольский край	61,6	92,3	86,3
6	Ростовская область	76,8	80,2	63,4
7	Республика Адыгея	61,7	46,5	96,5
8	Республика Дагестан	68,0	65,1	50,5
9	Кабардино-Балкарская Республика	91,3	89,6	88,2
10	Карачаево-Черкесская Республика	78,0	94,1	76,9
11	Республика Северная Осетия – Алания	51,2	43,4	37,3
Среднее		70,1	72,7	67,8
Срок составления прогноза – 21 июля				
1	Республика Калмыкия	40,4	85,7	55,9
2	Астраханская область	75,3	58,6	67,6
3	Волгоградская область	73,6	72,3	51,3
4	Краснодарский край	91,9	85,6	74,3
5	Ставропольский край	67,1	96,3	97,1
6	Ростовская область	81,4	87,6	68,2
7	Республика Адыгея	64,8	53,5	95,4
8	Республика Дагестан	65,9	52	54,7
9	Кабардино-Балкарская Республика	99,2	98,1	97,4

Таблица 4 (окончание)

Субъект РФ		Оправдываемость прогноза, %		
		2012	2013	2014
10	Карачаево-Черкесская Республика	68,8	96,1	75,7
11	Республика Северная Осетия – Алания	51,6	45	39
Среднее		70,9	75,5	70,6

Во второй срок составления прогноза урожайности ярового ячменя с месячной заблаговременностью (21 июля) при допустимой погрешности прогнозов от 2,6 до 4,7 ц/га в зависимости от субъекта оправдываемость испытываемого метода оказалась выше, чем у инерционного и климатологического методов для семи субъектов Южного и Северо-Кавказского федеральных округов: Астраханской, Ростовской и Волгоградской областей, Ставропольского края, республик Калмыкия, Кабардино-Балкарская и Карачаево-Черкесская. Средняя оправдываемость прогнозов по рассматриваемой территории в трехлетний период производственных испытаний была выше 70 % (табл. 4).

Рекомендации о внедрении

Решением Технического совета Северо-Кавказского УГМС от 17 апреля 2015 г. динамико-статистические методы прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя по 11 субъектам Южного и Северо-Кавказского федеральных округов были внедрены в оперативную работу отдела агрометпрогнозов и агрометеорологии ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС».

Метод прогноза урожайности озимой пшеницы (срок составления прогноза – 21 мая):

– в качестве основного метода прогноза для девяти субъектов (Астраханская, Волгоградская области, Ставропольский и Краснодарский края, республики Калмыкия, Адыгея, Дагестан, Северная Осетия – Алания, Карачаево-Черкесская);

– в качестве вспомогательного метода для двух субъектов (Ростовская область, Кабардино-Балкарская Республика).

Метод прогноза урожайности озимой пшеницы (срок составления прогноза – 21 июня):

– в качестве основного метода прогноза для восьми субъектов (Волгоградская область, Ставропольский, Краснодарский края, республики Калмыкия, Адыгея, Дагестан, Северная Осетия – Алания, Карачаево-Черкесская);

– в качестве вспомогательного метода для трех субъектов (Астраханская и Ростовская области, Кабардино-Балкарская Республика).

Метод прогноза урожайности ярового ячменя (срок составления прогноза – 21 июня):

– в качестве основного метода прогноза для пяти субъектов (Астраханская, Ростовская области, Ставропольский край, республики Адыгея, Карачаево-Черкесская);

– в качестве вспомогательного метода для шести субъектов (Волгоградская область, Краснодарский край, республики Калмыкия, Дагестан, Северная Осетия – Алания, Кабардино-Балкарская).

Метод прогноза урожайности ярового ячменя (срок составления прогноза – 21 июля):

– в качестве основного метода прогноза для шести субъектов (Астраханская, Ростовская, Волгоградская области, Ставропольский край, республики Калмыкия, Карачаево-Черкесская);

– в качестве вспомогательного метода для пяти субъектов Краснодарский край, республики Дагестан, Северная Осетия – Алания, Кабардино-Балкарская, Адыгея).

Список литературы

1. *Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Богомолова Н.А.* Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации в Гидрометцентре России // Информационный сборник № 41. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2014. – С. 111 –126.

2. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. – М., Гидрометеиздат, 1983. – 8 с.

3. *Лебедева В.М.* Результаты испытания метода прогноза урожайности яровой пшеницы в Приволжском, Верхневолжском, Северо-Кавказском УГМС и УГМС Республики Татарстан с заблаговременностью 1–2 месяца // Информационный сборник № 39. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2012. – С. 110–120.

4. *Лебедева, В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.

5. *Полевой, А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.

6. *Полевой А.Н., Гончарова Т.А.* О прогнозировании урожайности зерновых и зернобобовых культур // Метеорология и гидрология. – 1984. – № 5. – С. 114–117.

7. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 98–107.

8. *Русакова Т.И., Лебедева В.М., Грингоф И.Г., Шкляева Н.М.* Современная технология поэтапного прогнозирования урожайности и валового сбора зерновых культур // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 7. – С. 101–108.

Т.В. Старостина, Н.В. Медведева

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ, ОВСА, ЗЕРНОВЫХ И ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР ПО ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Методы прогноза урожайности ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по отдельным муниципальным районам Омской области разработаны в рамках выполнения темы 1.1.7.1 (автор – Т.В. Старостина, ФГБУ «СибНИГМИ»), зерновых и зернобобовых культур в целом по Омской области в рамках выполнения региональной темы 1.7.45 Плана НИОКР Росгидромета 2011–2013 гг. (авторы – Т.В. Старостина, ФГБУ «СибНИГМИ»; Н.В. Медведева, ФГБУ «Омский ЦГМС») [1, 2].

По муниципальным районам испытывались по две прогностические модели, позволяющие прогнозировать урожайность зерновых и зернобобовых культур на срок 21–23 июля. В целом по Омской области испытывались прогностические модели, позволяющие прогнозировать урожайность ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур в единые по России сроки 21–23 июня и 21–23 июля. При создании прогностических моделей использовались ряды урожайности зерновых культур в весе после доработки.

Для построения прогностических моделей использованы параметры, достаточно хорошо описывающие агрометеорологические условия вегетационного периода: сумма осадков (за период с марта по вторую декаду июля); среднесуточная температура воздуха; накопленная температура воздуха, определяемая как сумма температур за период с мая по вторую декаду июля; дефицит влажности воздуха за период с мая по вторую декаду июля. Для оценки увлажнения вегетационного

периода (май – вторая декада июля) применен гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова [4].

Авторские испытания методов прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур, ярового ячменя и овса по Омской области проводились на независимом материале 2009–2011 гг. Производственные испытания осуществлялись в 2012–2014 гг. в отделе агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Омский ЦГМС».

Оценка успешности методов прогноза урожайности зерновых культур проводилась согласно Методическим указаниям [3]. Сравнительная оценка успешности испытываемого метода прогноза проводилась с инерционными и климатологическими прогнозами, поскольку в настоящее время в оперативной практике агрометеорологов Омского ЦГМС расчетные методы прогноза урожайности в весе после доработки отсутствуют. С целью получения наиболее достоверных выводов о новых методах были проанализированы результаты оправдываемости прогнозов за 2009–2014 гг., т. е. за период, включающий авторские и производственные испытания.

Анализ оправдываемости прогнозов среднеобластной урожайности ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по испытываемому методу показал, что по результатам авторской проверки методические прогнозы урожайности по всем моделям в течение трех лет (2009, 2010, 2011 гг.) обеспечили хороший результат: оправдываемость 81–92 %. Оправдываемость методических прогнозов урожайности зерновых и зернобобовых культур по муниципальным районам Омской области в основном колеблется от 83 до 94,0 % (табл. 1).

При анализе оправдываемости прогнозов среднеобластной урожайности ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по Омской области, составленных по новому методу, выявлено, что успешнее были уточненные прогнозы (на срок 21–23 июля). Как в годы авторских, так и в годы оперативных испытаний уточненные прогнозы имели высокую оправдываемость, что значительно выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов (табл. 1). Предварительные методические прогнозы (на срок 21–23 июня) в годы авторской проверки имели оправдываемость выше 80 %.

Таблица 1

**Оправдываемость (%) прогнозов урожайности зерновых
и зернобобовых культур, ярового ячменя и овса по Омской области
(по величине относительной ошибки)**

Район (культура)	№ модели	Методические прогнозы		Инерцион- ные	Климатоло- гические	
		2009– 2011 гг.	2012– 2014 гг.			Средняя за 2009–2014 гг.
Исилькульский	1	88,5	84,5	86,5	61,2	78,7
	2	88,2	91,1	89,7	61,2	78,7
Калачинский	1	91,2	83,7	87,4	62,7	75,1
	2	93,7	84,0	88,8	62,7	75,1
Одесский	1	84,2	73,7	78,9	35,4	67,6
	2	85,4	75,0	80,2	35,4	67,6
Омский	1	89,5	92,9	91,2	64,8	80,6
	2	91,0	94,9	92,9	64,8	80,6
Павлоградский	1	86,0	82,2	84,1	64,1	81,5
	2	90,8	93,1	91,9	64,1	81,5
Полтавский	1	87,9	77,9	82,9	50,9	72,1
	2	88,1	77,1	82,6	50,9	72,1
Русскополян- ский	1	85,9	77,6	81,7	42,5	66,8
	2	83,3	94,6	88,9	42,5	66,8
Таврический	1	90,6	69,7	80,2	41,3	68,3
	2	91,0	68,8	79,9	41,3	68,3
Черлакский	1	88,7	73,0	80,8	50,2	70,9
	2	87,2	70,9	79,1	50,2	70,9
Нововаршав- ский	1	89,1	71,7	80,4	50,1	67,8
	2	91,2	71,1	81,2	50,1	67,8
Ячмень по области	1	80,9	72,4	76,6	46,5	69,2
	2	88,9	76,2	82,5	46,5	69,2
	3	88,4	76,0	82,3	46,5	69,2

Таблица 1 (окончание)

Район (культура)	№ модели	Методические прогнозы		Инерцион- ные	Климатоло- гические	
		2009– 2011 гг.	2012– 2014 гг.			Средняя за 2009–2014 гг.
Овес по области	1	83,1	86,1	84,6	61,9	78,9
	2	91,9	89,6	90,8	61,9	78,9
	3	84,1	95,9	90,0	61,9	78,9
Зерновые и зернобобовые по области	1	86,3	83,2	84,8	57,6	77,4
	2	89,9	86,5	88,2	57,6	77,4
	3	86,0	95,5	90,7	57,6	77,4

Примечание. По районам срок составления прогнозов 21–23 июля, по области 1 модель – предварительный срок (21–23 июня), 2–3 модель – уточненный срок (21–23 июля).

В годы оперативных испытаний менее успешными были методические предварительные прогнозы в 2012 г. В этом году предварительная прогнозируемая урожайность ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур оказалась выше фактической и превысила допустимую погрешность. В 2012 г. на территории Омской области наблюдалась продолжительная засуха. За последние 20 лет такая засуха и столь низкая урожайность, как в 2012 г., в Омской области были отмечены впервые. Необходимо отметить, что модели уловили значительное уменьшение урожайности, и во второй срок уточненные прогнозы оправдались.

В среднем за весь период авторских и производственных испытаний оправдываемость относительной ошибки предварительных методических прогнозов (на срок 21–23 июня) составила по ячменю 76,6 % (выше на 30,1 % инерционного и на 7,4 % климатологического прогнозов); по овсу 84,6 % (выше на 22,7 % климатологического и на 5,9 % инерционного прогнозов); по зерновым и зернобобовым культурам 84,8 % (выше на 27,2 % инерционного и на 7,4 % климатологического прогнозов). На срок 21–23 июля средняя оправдываемость составила по ячменю 82,5 % (выше на 36,0 % инерционного и на 13,3 % климатологического прогнозов), по овсу 90,8 % (выше на 30,9 %

инерционного и на 11,9 % климатологического прогнозов), по зерновым и зернобобовых культурам 90,7 % (выше на 33,1 % инерционного и на 13,3 % климатологического прогнозов).

Оценка оправдываемости составленных прогнозов согласно Методическим указаниям [3] по величине допустимой погрешности ($\Delta\sigma$) позволила выявить число оправдавшихся методических, инерционных и климатологических прогнозов (табл. 2). Анализ таблицы выявил явное преимущество нового метода. Так, за период испытаний из шести составленных прогнозов оправдалось: в первый срок по ячменю – пять; по овсу, зерновым и зернобобовым культурам – шесть; во второй срок оправдались все шесть прогнозов. Оправдываемость метода составила в первый срок по ячменю 83 %; по овсу, зерновым и зернобобовым культурам – 100 %, что превышает оправдываемость инерционных и климатологических прогнозов на 50 %; во второй срок по всем культурам – 100 % (оправдываемость инерционных и климатологических прогнозов значительно ниже – от 17 до 50 %).

Таблица 2

Результаты испытания методов прогноза урожайности зерновых зернобобовых культур, ярового ячменя и овса по Омской области за 2009–2014 гг. (по $\Delta\sigma$)

Район (культура)	№ модели	Кол-во прогнозов		Оправдываемость прогнозов, %			Относительная ошибка прогнозов, %		
		составлено	оправдалось	методических	инерционных	климатологических	методических	инерционных	климатологических
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Исилькульский	1	6	6	100	17	33	13,5	38,8	21,3
	2	6	6	100	17	33	9,8	38,8	21,3
Калачинский	1	6	6	100	17	33	12,6	37,3	24,9
	2	6	6	100	17	33	11,2	37,3	24,9
Нововаршавский	1	6	5	83	17	50	19,6	49,9	32,2
	2	6	6	100	17	50	18,8	49,9	32,2

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Одесский	1	6	6	100	17	33	19,7	64,6	32,1
	2	6	6	100	17	33	19,8	64,6	32,1
Омский	1	6	6	100	17	67	8,8	35,2	19,4
	2	6	6	100	17	67	7,1	35,2	19,4
Павлоградский	1	6	6	100	33	67	15,9	35,9	18,5
	2	6	6	100	33	67	8,1	35,9	18,5
Полтавский	1	6	5	83	17	33	17,1	49,1	27,9
	2	6	5	83	17	33	17,4	49,1	27,9
Русскополян- ский	1	6	6	100	33	67	18,3	57,5	33,2
	2	6	6	100	33	67	11,1	57,5	33,2
Таврический	1	6	5	83	0	33	19,8	58,7	31,7
	2	6	4	83	0	33	20,1	58,7	31,7
Черлакский	1	6	5	83	17	50	19,2	49,8	29,1
	2	6	5	83	17	50	20,9	49,8	29,1
Ячмень по области	1	6	5	83	17	17	23,4	53,5	30,8
	2	6	6	100	17	17	17,5	53,5	30,8
	3	6	6	100	17	17	17,7	53,5	30,8
Овес по области	1	6	6	100	17	50	15,4	38,1	21,1
	1	6	6	100	17	50	9,2	38,1	21,1
	2	6	6	100	17	50	10,0	38,1	21,1
Зерновые и зернобобовые по области	1	6	6	100	17	50	15,2	42,4	22,6
	2	6	6	100	17	50	11,8	42,4	22,6
	3	6	6	100	17	50	9,3	42,4	22,6

Примечание. По районам срок составления прогнозов 21–23 июля, по области 1 модель – предварительный срок (21–23 июня), 2–3 модели – уточненный срок (21–23 июля).

В годы производственных испытаний оценка качества методических прогнозов урожайности зерновых и зернобобовых культур по муниципальным районам Омской области показала, что по Таврическому, Полтавскому, Одесскому и Нововаршавскому районам

оправдываемость была ниже, чем в годы авторских испытаний (см. табл. 1). Неудачными были методические прогнозы в 2012 году: прогнозируемая урожайность оказалась больше фактической. Улучшилось качество методических прогнозов в период производственных испытаний по Омскому, Исилькульскому и Павлоградскому районам.

В среднем за шесть лет испытаний оправдываемость прогнозов в процентах абсолютной ошибки, составленных по новому методу, оказалось достаточно высокой – от 80 до 93 %, что в пределах и выше принятого порога успешности агрометеорологических прогнозов и значительно выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов (табл. 1).

Оценка оправдываемости методических прогнозов урожайности зерновых и зернобобовых культур по муниципальным районам Омской области по величине допустимой погрешности ($\Delta\sigma$) за весь период испытаний показала, что по Таврическому, Полтавскому и Черлакскому муниципальным районам оправдываемость прогнозов составила 83 %, что значительно выше оправдываемости инерционных и климатологических прогнозов (оправдываемость инерционных и климатологических прогнозов – 17–33 %). По Нововаршавскому району по 1 модели – 83 %, по 2 модели – 100 %. По Омскому, Калачинскому, Исилькульскому, Павлоградскому, Русскополянскому, Одесскому муниципальным районам все шесть прогнозов оправдались. Оправдываемость метода по муниципальным районам составила 100 % (оправдываемость инерционных и климатологических прогнозов в основном от 17 до 50 %).

Решением технического совета ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» от 18 ноября 2015 г. и ЦМКП от 03 декабря 2015 г. рекомендованы с 2016 года к внедрению в оперативную практику агрометеорологов ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» в качестве основных методы прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по отдельным муниципальным районам, ярового ячменя и овса по Омской области (автор – Т.В. Старостина, ФГБУ «СибНИГМИ») и урожайности зерновых и зернобобовых культур по Омской области (авторы – Т.В. Старостина, ФГБУ «СибНИГМИ»; Н.В. Медведева, Омский ЦГМС – филиал ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС»).

Список литературы

1. Методы прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по отдельным муниципальным районам, ярового ячменя и овса по Омской области: отчет о НИР (заключ.) / отв. исп. Т.В. Старостина, ФГБУ «СибНИГМИ». – Новосибирск, 2013. – 86 с.

2. Разработка автоматизированной технологии оценки условий вегетации и прогноза урожайности и валового сбора зерновых и зернобобовых культур по Кемеровской области, методов и технологий прогноза урожайности и валового сбора многолетних и однолетних трав в Новосибирской, Кемеровской областях и Алтайском крае. Разработка метода прогноза урожайности и валового сбора пшеницы, зерновых и зернобобовых культур по Омской области: отчет о НИР (заключ.) / науч. руковод. Т.В. Старостина, ФГБУ «СибНИГМИ». – Новосибирск, 2013. – 117 с.

3. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеоздат, 1991.

4. *Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 169–178.

М.Ю. Кулаков, И.М. Ашик, К.В. Фильчук

ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЕТА И КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ДРЕЙФА ЛЬДА НА АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА И АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Дрейф льда – это сложный процесс, который определяется воздействием ветра и течений, наклоном поверхности моря, морфометрическими параметрами самой льдины и характеристиками окружающих льдов. Такое обилие необходимой информации может быть получено только в результате использования модели совместной циркуляции вод и льдов. Разработанная технология прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) и его морей базируется на модели *AARI-IOCM* [1]. *AARI-IOCM* представляет собой результат объединения трех моделей: трехмерной бароклинной модели циркуляции вод, модели дрейфа ледяного покрова и термодинамической модели морского льда. В целом ряде работ [2, 3] было показано, что *AARI-IOCM* достаточно хорошо воспроизводит ледовые условия и циркуляцию вод и льдов в Северном Ледовитом океане. При краткосрочных прогнозах термодинамический блок модели не задействован.

На основании модели *AARI-IOCM* уже разработаны метод и технологии расчета и краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Северном Ледовитом океане и его морях, которые получили рекомендацию ЦМКП Росгидромета для использования в оперативной работе ААНИИ (Решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам от 24 апреля 2013 г.). В последнее время модель также успешно используется в оперативной технологии прогноза айсбергов [4, 5].

1. Модель циркуляции вод

Систему уравнений термогидродинамики океана запишем в виде:

– уравнения движения в приближении Буссинеска

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} A_z \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} A_L \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_L \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} A_z \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} A_L \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_L \frac{\partial v}{\partial y}; \quad (1.2)$$

– уравнение гидростатики

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g; \quad (1.3)$$

– уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (1.4)$$

– уравнение переноса тепла и соли

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(T,S)}{\partial t} + u \frac{\partial(T,S)}{\partial x} + v \frac{\partial(T,S)}{\partial y} + w \frac{\partial(T,S)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \eta \frac{\partial(T,S)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial(T,S)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial(T,S)}{\partial y}; \end{aligned} \quad (1.5)$$

– уравнение состояния

$$\rho = F(T, S), \quad (1.6)$$

где u, v, w – компоненты вектора скорости течения по осям x, y, z соответственно; f – параметр Кориолиса; P – давление; ρ – плотность воды; T, S – температура и соленость морской воды; A_z, A_L – коэффициенты вертикального и горизонтального турбулентного обмена количеством движения; η, μ – коэффициенты турбулентной диффузии по вертикальной и горизонтальной осям.

Приведенные уравнения записаны применительно к Северному полушарию в правосторонней системе декартовых координат (ось z направлена вниз от невозмущенной поверхности).

Примем следующие граничные условия по вертикальной координате.

На поверхности моря $z = \xi(x, y, t)$:

$$\rho_0 A_z \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau_x; \quad \rho_0 A_z \frac{\partial v}{\partial z} = -\tau_y; \quad (1.7)$$

$$w = -\left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} \right); \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial(T, S)}{\partial z} = Q_{T, S}, \quad (1.9)$$

где $\tau_{x,y}$ – компоненты вектора тангенциального напряжения трения на поверхности воды; ξ – отклонение поверхности моря от невозмущенного состояния; $Q_{T,S}$ – поток тепла и солей.

На дне $z = H(x, y)$ примем условия равенства нулю вектора скорости:

$$u = v = w = 0; \quad (1.10)$$

и отсутствие вертикального потока тепла и солей

$$\frac{\partial(T, S)}{\partial z} = 0. \quad (1.11)$$

Система уравнений (1.1) – (1.11) замкнута с точностью до определения внутренних (A_z, A_L, η, μ) и внешних ($\tau_{x,y}, Q_{T,S}$) параметров задачи и может быть реализована с использованием вычислительных схем, разработанных для решения задачи о нестационарной циркуляции вод в примитивных уравнениях. Однако реализация такой задачи при высоком пространственном разрешении требует в соответствии с критерием Куранта–Фридрихса–Леви малых временных шагов ($\Delta t \approx 15$ с, при $\Delta t = \Delta x = \Delta y = 13,8$ км) и, следовательно, нереально большого для доступных нам компьютеров типа IBM PC времени вычислений.

Для сокращения времени вычислительного процесса проинтегрируем уравнения (1.1), (1.2) от поверхности до дна, пренебрегая адвективными членами:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0 H} \int_0^H (H-z) \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + f \bar{v} + \frac{\tau_x - \tau_x^{Bot}}{\rho_0 H} + \frac{\partial}{\partial x} A_L \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_L \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0 H} \int_0^H (H-z) \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - f\bar{u} + \frac{\tau_y - \tau_y^{Bot}}{\rho_0 H} + \frac{\partial}{\partial x} A_L \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_L \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, \quad (1.13)$$

где $\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u dz$, $\bar{v} = \frac{1}{H} \int_0^H v dz$ — функции только переменных x, y , описывающие баротропную составляющую поля течений в океане.

Уравнение неразрывности после интегрирования имеет вид:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = - \left(\frac{\partial \bar{u} H}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} H}{\partial y} \right). \quad (1.14)$$

Уравнения (1.12–1.14) представляют классическую задачу по определению средней скорости течений и уровня моря в рамках теории «мелкой воды». Подобный прием используется в большинстве разработанных к настоящему времени моделей циркуляции океана (например, [10, 14]), поскольку позволяет значительно сократить время вычислений. Достигается это тем, что с малым временным шагом, ограниченным критерием Куранта–Фридрихса–Леви, интегрируется только двумерная задача.

Коэффициент вертикального турбулентного обмена определяется из стационарного уравнения энергии турбулентности в соответствии с [11]. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена определяется по формуле Смагоринского, хорошо зарекомендовавшей себя в практике подобных расчетов [12].

В качестве уравнения состояния (1.6) используется формула ЮНЕСКО [7].

2. Модель дрейфа льда

Ледяной покров в модели описывается следующими характеристиками: h — средняя толщина ровного льда, изменяющаяся за счет термического стаивания и нарастания; h_h — толщина торосов (в данной формулировке — величина фиксированная); N_1 — относительная площадь ячейки, занятая льдом толщиной h ; N_2 — относительная площадь, занятая торосами; N_0 — относительная площадь чистой воды; h_s — высота снежного покрова на ровном льду.

Предполагается, что N_0 не может быть меньше 0,5 %. Таким образом, следуя [13], параметризуется наличие участков чистой воды,

образовавшихся вследствие стохастических процессов деформации ледяного покрова.

Уравнение эволюции ледяного покрова запишем в виде:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \text{div}(m \bar{u}_i) + f_T = 0, \quad (2.1)$$

$$f_T = N_1 \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)_T + h \left(\frac{\partial N}{\partial t} \right)_T + h_h \left(\frac{\partial N_h}{\partial t} \right)_T + N_2 \left(\frac{\partial h_h}{\partial t} \right)_T, \quad (2.2)$$

где масса льда $m = (N_1 h + N_2 h_h) \rho_i + N_1 h_s \rho_s$; f_T – функция источника или стока, описывающая термодинамический рост или таяние ровного льда, боковое таяние ровного льда и торосов, таяние торосов на верхней и нижней границе.

В моделях динамики морского льда его дрейф обычно описывается уравнениями баланса импульса. При этом морской ледяной покров рассматривается как двухмерный континуум. Запишем это уравнение, следуя [8], в виде:

$$m \frac{\partial \bar{u}^i}{\partial t} = -m f \bar{k} \times \bar{u} + \tau_a + \tau_w - mg \nabla_H \xi + \bar{F}, \quad (2.3)$$

где $\bar{u}^i = u_i + v_j$ – вектор скорости дрейфа; f – параметр Кориолиса; g – ускорение свободного падения; ξ – уровень моря; τ_a – тангенциальное напряжение ветра на верхней поверхности льда; τ_w – напряжение трения на нижней поверхности льда; \bar{F} – сила внутреннего взаимодействия льда; $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы в $x, y, \text{ и } z$ направлении соответственно.

Силу внутреннего взаимодействия в ледяном покрове льда запишем в виде:

$$\bar{F} = \nabla \cdot \sigma, \quad (2.4)$$

где σ – тензор напряжений (σ_{ij}), пространственно-временная изменчивость которого описывается в предположении упруго-вязко-пластической реологии ледяного покрова, предложенной в [9]:

$$\frac{1}{E} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} + \frac{1}{2\eta} \sigma_{ij} + \frac{\eta - \zeta}{4\eta\zeta} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{P}{4\zeta} \delta_{ij} = \varepsilon_{ij}. \quad (2.5)$$

В уравнении (2.5) – скорость деформации, определяемая как $\varepsilon_{ij} = 1/2[(du'_i/dx_j) + (du'_j/dx_i)]$; P – напряжение во льду, являющееся функцией сплоченности и толщины льда; E – аналог модуля упругости Юнга; η и ζ – массовая и сдвиговая вязкости, связанные соотношением:

$$\eta = \zeta / e^2, \quad (2.6)$$

где e – константа и

$$\zeta = 0,5P[(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)(1 + e^{-2}) + 4e^{-2}\varepsilon_1^2 + 2\varepsilon_1\varepsilon_2(1 - e^{-2})]^{1/2}. \quad (2.7)$$

Следует отметить, что величина параметра E не может быть постоянной, поскольку в модели возникали бы динамические эффекты даже в условиях свободного дрейфа, когда реология льда не должна играть никакой роли. Исследуя условия устойчивости и сходимости системы уравнений динамики льда, Hunke и Dukowicz, [9] предложили следующий вид для этого параметра

$$E = \frac{2E_0\rho_iNh}{\Delta t^2} \min(\Delta x^2, \Delta y^2). \quad (2.8)$$

Введенная в реологическое соотношение такая параметризация E допускает развитие упругих волн в ледяном покрове, которые приводят к быстрой подстройке поля скоростей к быстромменяющемуся форсингу. При расчетах мы принимаем $E_0 = 0,25$, $e = 2$ и $P = P_0he^{-C(1-N)}$, где P_0 и C являются эмпирическими константами со значениями $27,5 \text{ кНм}^{-2}$ и 20 соответственно [15].

3. Адаптация и верификация модели

В настоящий момент модель *AARI-IOCM* адаптирована к акватории Северного Ледовитого океана с разрешением $13,8 \text{ км}$. Размер сеточной области 440×395 точек. Донная топография и конфигурация береговой черты получена из архива GEBCO. По вертикали разрешение переменное и составляет 33 расчетных горизонта.

Для расчетов термохалинной составляющей циркуляции вод используются данные по температуре и солёности воды из Ocean Atlas (*WOA05*) для летнего и зимнего периодов.

Расходы основных рек СЛО задаются согласно климатическим данным (табл. 1).

Таблица 1

Среднегодовые величины среднемесячных расходов основных рек (м³/с)

Река	Годы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Печора	1916–1998	1099	896	750	975	9974	16223	6914	3737	4035	4023	2178	1379
Обь	1930–1999	4712	3935	3460	3614	14930	32860	29790	22020	13700	10320	6330	5377
Пур	1939–1991	298	252	229	226	674	3791	1721	996	925	739	505	395
Таз	1962–1996	304	257	232	223	884	4364	2704	1007	899	807	549	405
Енисей	1936–1999	6265	6318	6183	6279	26502	81181	26938	17344	16951	13944	7102	6020
Пясына	1961–1986						4063	8239	2486	2107			
Хатанга	1961–1993						12220	6980	3755	3063			
Анабар	1954–1999					96	3140	958	623	441	84		
Оленек	1964–1999	8	4	2.5	2	540	8077	2430	1179	1351	381	81	27
Лена	1935–2000	2838	2234	1722	1427	6582	74034	39913	27376	24266	14210	3534	2975
Яна	1972–1999	3	1	0.6	0.8	471	4290	3056	2623	1688	246	51	12
Индигирка	1937–1998	36	20	13	9	296	5663	5420	4287	2655	527	132	77
Кольма	1977–2000	263	221	209	181	1782	14944	7433	6089	5415	1823	481	349
Маккензи	1973–2000	3886	3609	3362	3488	13630	20460	17140	13770	11310	9020	4725	3638

Гармонические постоянные трех основных приливных волн (M_2 , S_2 , K_1) были заранее рассчитаны на всех узлах сетки. Данные на границах расчетной области с Атлантическим и Тихим океанами для расчетов были любезно предоставлены А.Ю. Прошутинским. На рис. 1 в качестве примера представлена котидальная карта приливной волны M_2 , полученная по результатам моделирования. Учет приливной составляющей течения производится следующим образом. Приливная компонента уровня моря рассчитывается в каждой точке сеточной области и прибавляется к уровню, полученному при решении баротропной задачи, перед расчетом трехмерной скорости течения.

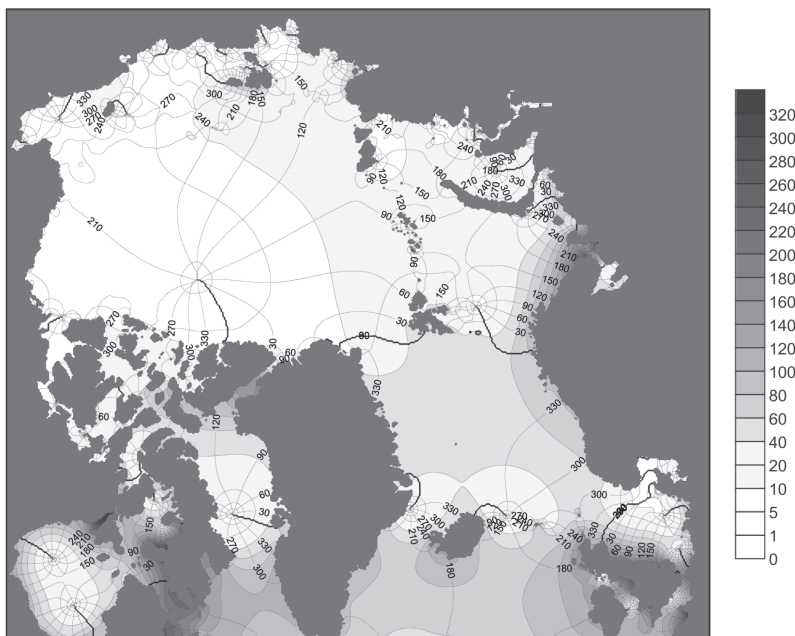


Рис. 1. Котидальная карта приливной волны M_2 , полученная по результатам моделирования.

При диагностических расчетах для определения тангенциального напряжения на поверхности используются поля приземного атмосферного давления и температура воздуха из NCEP/NCAR Reanalysis, представленные на сетке $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ четыре раза в сутки.

Модель тестировалась на воспроизведение дрейфа льда в Северном Ледовитом океане. На рис. 2 представлено сопоставление расчетных и наблюдаемых траекторий ледовых буев в мае 2010 года, а на рис. 3 – воспроизведение дрейфа станций СП.



Рис. 2. Сопоставление расчетных и наблюдаемых траекторий ледовых буев в мае 2010 г.

4. Технология оперативного прогноза

В технологии можно выделить ряд крупных технологических звеньев, или составляющих.

В первую очередь, это составляющая «Подготовка и ввод исходных данных». В нее включены процедуры ввода основных параметров расчета, задания массивов идентификаторов, глубин, температуры и солености воды (в зависимости от сезона вводятся летние или зимние поля). Все эти массивы являются постоянными и хранятся на жестком диске компьютера.

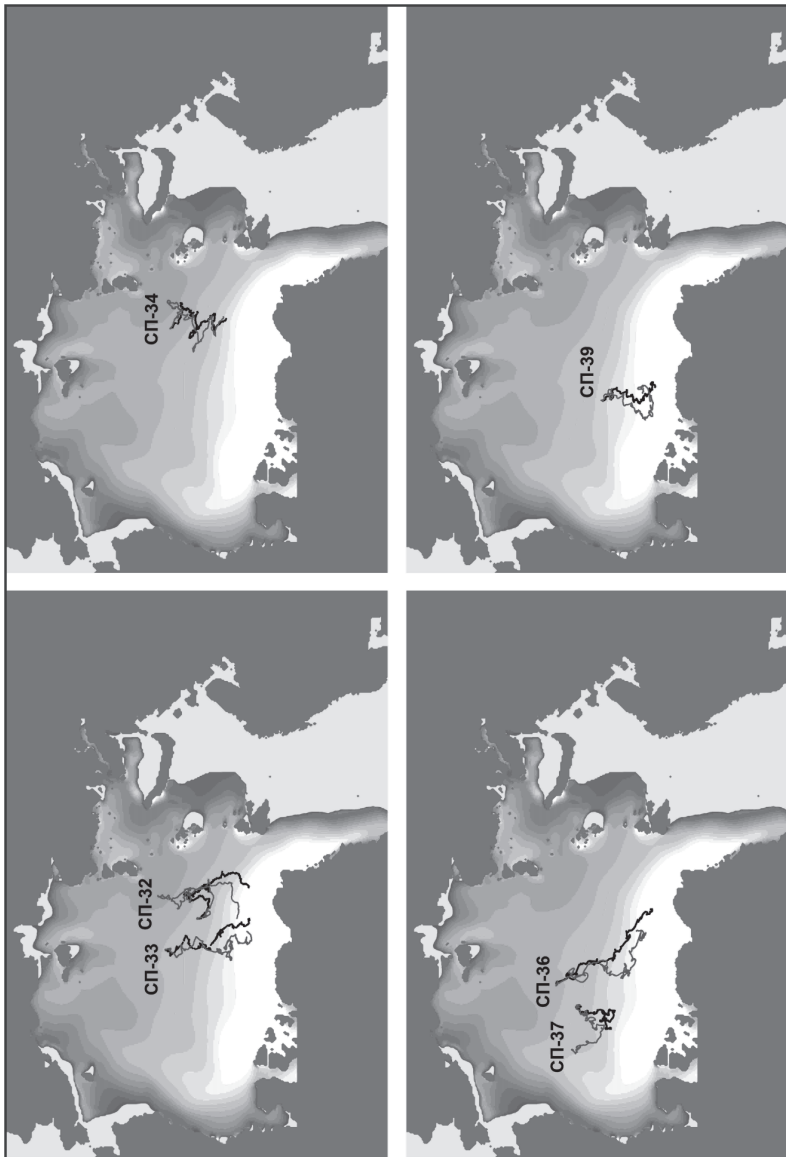


Рис. 3. Воспроизведение дрейфа станций СП.

Для обеспечения работы модели в оперативном режиме разработан программный модуль усвоения диагностических и прогностических данных сторонних источников.

Источником информации о состоянии ледяного покрова на целевой акватории служит продукция Центра ледовой гидрометеорологической информации (ЦЛГМИ) ААНИИ. Ледовые карты еженедельно поставляются центром в формате Sea Ice Grid (SIGRID-3), который является прикладным расширением формата хранения векторной графической информации Shapefiles. Файлы SIGRID-3 содержат информацию о ледовой обстановке на участках акватории, ограниченных полигонами. Внутри отдельно взятого полигона характеристики состояния ледяного покрова идентичны.

Последовательно перебирая все полигоны Shape-файла, программное обеспечение модуля усвоения входной информации осуществляет преобразование координат вершин полигона, переводя их в декартову систему расчетной области модели, затем к каждому узлу расчетной сетки применяется алгоритм определения принадлежности точки полигону. Каждому узлу сетки, попавшему в границы полигона, присваиваются значения параметров состояния ледяного покрова, характеризующие полигон. В оперативном режиме работы информация о ледовой обстановке обрабатывается в соответствии с временным регламентом деятельности ЦЛГМИ, данные в формате SIGRID-3 усваиваются моделью после каждого обновления, выпускаемого центром.

Доступ к файлам SIGRID-3 осуществляется посредством обращений к файловой системе сервера поставщика данных ЕСИМО по абсолютным путям, формируемым с соблюдением соглашений об именовании каталогов и файлов.

В качестве входной метеорологической информации используются прогнозы полей приземного давления, выпускаемые Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF), поступающие по каналам службы автоматизированного сбора и передачи данных (АСПД) в формате GRIB (Grid in Binary). Файлы GRIB архивируются на сервере с соблюдением структуры каталогов, позволяющей однозначно идентифицировать дату выпуска прогноза.

Перед запуском процедуры модельного расчета модуль преобразования обращается в файловое хранилище сервера по абсолютному пути, сформированному на основе значений даты и времени производства прогноза с учетом принятых соглашений об именовании папок. Из локализованного GRIB-файла, с использованием программного интерфейса формата GRIB, извлекаются диагностическое поле приземного давления, а также прогностические поля суточной дискретности. Поскольку прогнозы ECMWF поставляются на географической сетке раздельно по девяностоградусным долготным секторам полушарий, программный алгоритм модуля предусматривает выполнение операции объединения четырех секторов Северного полушария с целью обеспечить покрытие акватории Северного Ледовитого океана. Образованные в результате слияния сеточные области для каждого прогностического срока выгружаются в файлы формата ASCII, которые считываются программой последовательно по мере выполнения расчета для вычисления атмосферного форсинга.

Основным блоком технологии является «Расчет параметров циркуляции вод и льдов СЛО» по модели *AARI-IOCM*. Первым шагом в этом блоке служит процедура задания режима расчетов. Сама численная схема расчета практически не зависит от выбранного режима. Разница состоит только в формировании для вывода результатов расчетов. Всего предусмотрено три режима вывода результатов.

Первый — векторные поля скоростей дрейфа льда на заданные моменты времени. При этом можно задавать для вывода не всю акваторию СЛО, а любой прямоугольный ее фрагмент. Кроме того, для улучшения восприятия предусмотрен ввод дискрета, через который будут выводиться вектора скорости дрейфа, по умолчанию в каждом узле через 13,8 км. На рис. 4 приведен пример вывода векторного поля в северной части моря Лаптевых.

Второй — набор последовательностей точек положения выбранных льдин. Примеры такого вывода представлены на рис 2, 3 и 5.

Третий — комбинированный, включающий и векторные поля, и траектории выбранных льдин.

Кроме того, предусмотрено хранение результатов расчетов в числовом формате для возможности дальнейшей обработки.

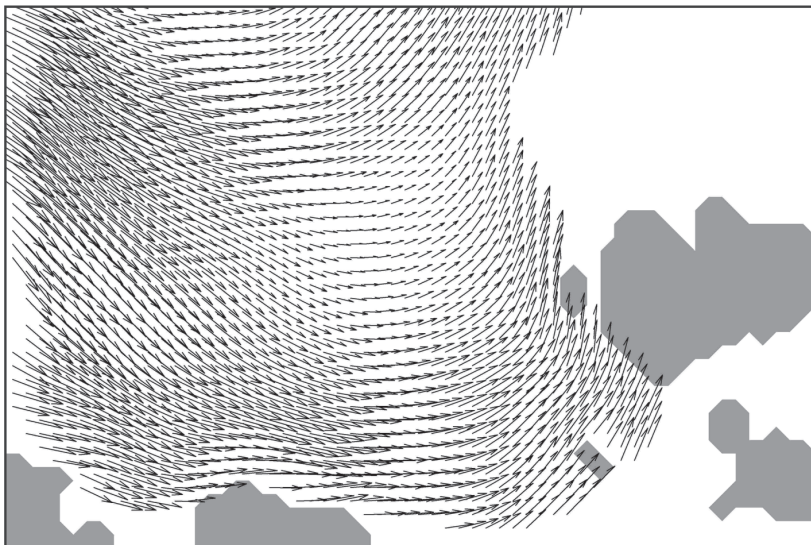


Рис. 4. Пример вывода векторного поля в северной части моря Лаптевых.

5. Результаты оперативных расчетов дрейфа льда

Для проведения испытаний технологии расчета и краткосрочного прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей были использованы данные о дрейфе буев в сентябре 2014 года.

На рис. 5 представлены траектории буев и их воспроизведение моделью за весь месяц.

Количественная оценка результатов производилась по перемещениям буев за период прогноза. Такой способ достаточно нагляден и позволяет оперировать скалярными величинами, а не векторами. Согласно Наставлению [6], оправдавшимся прогнозом будем считать только такой, ошибка которого меньше некой допустимой ошибки, а в качестве допустимой ошибки используем 20 % амплитуды изменения величины за период заблаговременности прогноза. Статистическая обработка результатов наблюдений показала, что наибольшие перемещения совершил буй 47502. Пройденные за различные периоды максимальные расстояния и соответствующие им допустимые ошибки приведены в табл. 2.

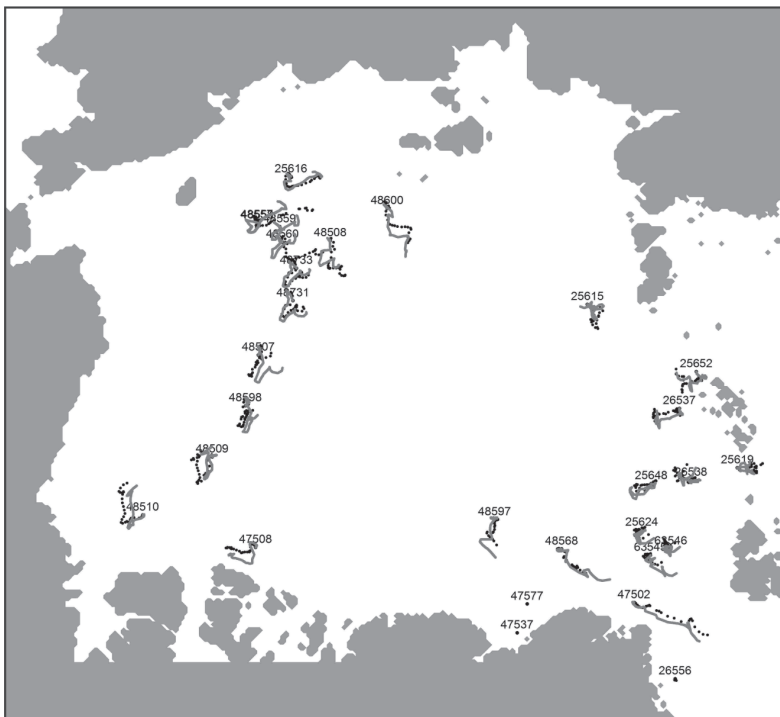


Рис. 5. Траектории буев и их воспроизведение моделью за весь месяц.

Таблица 2

Максимальные перемещения, совершенные буями в сентябре 2014 г., и соответствующие им допустимые ошибки

Период, сутки	Максимальное перемещение, км	Допустимая ошибка, км
1	38,2	7,6
2	70,3	14,1
3	104,7	21

В табл. 3–5 приведены данные о средних и максимальных ошибках расчета дрейфа льда в зависимости от продолжительности дрейфа: за одни, двое и трое суток. Обобщая эти данные, можно сказать, что

средняя и максимальные ошибки расчета дрейфа льда в значительной степени зависят от продолжительности дрейфа. Так, средняя ошибка, осредненная по всем буям, составила 5,8 км при продолжительности дрейфа одни сутки, 9,5 км – двое суток и 12,9 км при продолжительности дрейфа трое суток. Максимальная ошибка, в свою очередь, составила 38,4, 40,9 и 48,3 км соответственно.

Таблица 3

Оценка качества расчетов перемещения буев за одни сутки

№ буя	Средняя ошибка, км	Максимальная ошибка, км	Оправдываемость, %
25615	5,7	15,2	75,9
25616	5,9	13,0	75,9
25619	5,2	12,8	79,3
25624	5,2	35,0	86,2
25648	5,4	34,4	86,2
25652	6,1	24,3	75,9
26537	4,9	33,1	93,1
26538	6,3	38,4	75,9
47502	7,4	19,1	55,2
47508	6,0	20,9	72,4
48507	6,3	18,4	72,4
48508	4,0	10,1	89,7
48509	5,3	27,2	93,1
48510	5,8	22,4	79,3
48558	8,2	22,1	58,6
48559	7,7	16,0	58,6
48560	6,3	14,7	58,6
48568	6,5	24,4	72,4
48597	5,3	24,5	82,8
48598	4,6	15,0	86,2
48600	6,5	21,0	69,0
48731	4,0	11,6	89,7
48733	5,4	13,9	82,8
63545	6,2	26,8	79,3
63546	5,8	25,1	79,3

Таблица 4

Оценка качества расчетов перемещения буев за двое суток

№ буя	Средняя ошибка, км	Максимальная ошибка, км	Оправдываемость, %
25615	9,4	20,7	82,1
25616	10,5	23,1	75,0
25619	9,1	20,5	85,7
25624	7,3	23,7	85,7
25648	7,4	29,6	89,3
25652	9,7	25,9	78,6
26537	6,5	17,8	92,9
26538	8,2	24,4	89,3
47502	11,5	34,5	71,4
47508	10,3	29,6	75,0
48507	10,1	20,1	82,1
48508	7,1	19,7	89,3
48509	7,2	13,8	100,0
48510	9,7	20,8	78,6
48558	15,0	40,9	46,4
48559	15,2	25,7	46,4
48560	11,8	26,8	67,9
48568	11,0	27,9	75,0
48597	9,2	22,7	78,6
48598	6,7	20,5	89,3
48600	9,9	22,9	82,1
48731	6,1	16,3	92,9
48733	9,1	21,5	85,7
63545	10,1	25,0	82,1
63546	9,6	29,5	78,6

При использовании для оценки качества расчетов понятие оправдываемости при допустимых ошибках, приведенных в табл. 2, зависимости от продолжительности дрейфа не отмечается. Средняя для всех буев оправдываемость при продолжительности дрейфа одни сутки

составила 77 %, двое суток – 80 % и трое суток – 84 %. Очевидно, что это связано со значительным увеличением допустимой ошибки при увеличении продолжительности дрейфа.

Таблица 5

Оценка качества расчетов перемещения буев за трое суток

№ буй	Средняя ошибка, км	Макс. ошибка, км	Оправдываемость, %
25615	13,2	25,1	88,9
25616	14,3	26,3	85,2
25619	12,9	25,7	88,9
25624	9,3	28,2	96,3
25648	9,5	37,0	92,6
25652	13,4	37,2	81,5
26537	8,3	19,1	100,0
26538	9,4	27,3	92,6
47502	14,9	41,1	66,7
47508	13,8	36,9	81,5
48507	14,2	26,7	88,9
48508	9,8	26,2	92,6
48509	9,5	17,8	100,0
48510	13,9	26,0	85,2
48558	19,6	48,3	66,7
48559	22,1	40,3	48,1
48560	16,8	33,6	63,0
48568	15,3	38,1	74,1
48597	12,6	27,5	81,5
48598	9,0	24,6	88,9
48600	13,6	29,6	88,9
48731	8,3	23,0	96,3
48733	12,3	25,1	85,2
63545	13,6	28,9	88,9
63546	12,8	30,8	92,6

Заключение

Предложенная технология расчета и краткосрочного прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей и результаты ее испытания были доложены ЦМКП Росгидромета 03.12.2015 г. ЦМКП Росгидромета рекомендовала внедрить метод в качестве основного для использования в ФГБУ «АНИИ» (утвержденное решение Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам № 140-08445/15и от 15 декабря 2015 г.). Данные прогнозы будут использоваться для оперативного обеспечения судоходства и решения прочих задач на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей России.

Список литературы

1. Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Шутилин С.В. AARI–IOCM – совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2012. – № 2 (92). – С. 6–18.
2. Кулаков М.Ю., Макштас А.П., Шутилин С.В. Модельные оценки чувствительности ледяного покрова Северного Ледовитого океана к изменениям форсингов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2012. – № 3 (93). – С. 66–74.
3. Кулаков М.Ю., Макштас А.П. Роль дрейфа льда в формировании ледяного покрова Северного Ледовитого океана в начале XXI века. – 2013. – № 2 (96). – С. 67–75.
4. Кулаков М.Ю., Демчев Д.М. Моделирование дрейфа айсбергов как часть ледового мониторинга в западной Арктике // Метеорология и гидрология (в печати).
5. Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Кулаков М.Ю., Демчев Д.М. Новые технологии обнаружения айсбергов и прогнозирования их дрейфа в западном секторе Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2015. – № 2 (104). – С. 21–32.
6. Наставление по службе прогнозов. Раздел 2. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада ЛТД, 2011. – 201 с.
7. Fofonoff N.P., Millard Jr R.C. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater // Unesco Tech. Pap. – 1983. – No. 44. – 53 p.
8. Hibler W.D. A Dynamic/Thermodynamic Sea Ice Model // J. Phys. Oceanogr. – 1979. – No. 9. – P. 815–846.
9. Hunke E.C., Dukowicz J.K. An Elastic–Viscous–Plastic Model for Sea Ice Dynamics // J. Phys. Oceanogr. – 1997. – № 27. – P. 1849–1867.

10. Killworth P.D., Stainforth D., Weeb D.J., Paterson S.M. The Development of a Free–Surface Bryan–Cox–Semtner Ocean Model // *J. Phys. Ocean.* – 1991. – No. 21. – P. 1333–1348.
11. Kochergin V.P. Three–dimensional prognostic models // *Three-Dimensional Coastal Ocean Models* / ed. N. S. Heaps, Coastal Estuarine Science Series, Amer. Geophys. Union. – 1987. – No. 4. – P. 201–208.
12. Oey L.–Y., Mellor G.L., Hires R.I. A three–dimensional simulation of the Hudson–Raritan Estuary. Part I: Description of the model and model simulation // *J. Phys. Oceanogr.* – 1985. – Vol. 15, No. 12. – P. 1676–1692.
13. Parkinson C.L., Washington W.M. A large scale numerical model of sea ice // *J. Geophys. Res.* – 1979. – Vol. 84. – P. 311–337.
14. Song Y., Haidvogel D. A semi–implicit ocean circulation model using a generalized topography–following coordinate system // *J. Comp. Physics.* – 1994. – Vol. 115. – P. 228–244.
15. Zhang, J., W.D. Hibler III. On an efficient numerical method for modeling sea ice dynamics // *J. Geophys. Res.* – 1997. – Vol. 102. – P. 8691–8702.

А.А. Зеленко, Ю.Д. Реснянский, Б.С. Струков

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

Введение

Информация о ветровых волнах, оказывающих существенное влияние на морской транспорт, гидротехнические сооружения, добывающие платформы, морской промысел, рекреационные комплексы представляет интерес для многих субъектов морской хозяйственной деятельности. Такая информация подразделяется на две основные категории: режимную и оперативную. Под режимной информацией понимаются статистические характеристики ветровых волн, относящиеся к длительным интервалам времени (климат или режим волн) [4]. Под оперативной информацией – сведения о текущем и ожидаемом на интервале нескольких суток состоянии поля ветровых волн (диагноз и прогноз).

Современные подходы к прогнозированию ветровых волн, как, впрочем, все чаще и для оценки режимных характеристик, основываются на численных гидродинамических моделях. Наибольшее распространение получили так называемые спектральные модели, основанные на численном решении сеточными методами уравнения баланса волновой энергии или волнового действия в спектральной форме [2, 4, 21, 24, 26].

Одна из таких моделей используется в комплексной системе прогнозирования ветрового волнения в океане и российских морях, развиваемой в Гидрометцентре России с 2010 г. Результаты испытаний системы для акваторий Черного, Азовского, Каспийского и Балтийского морей представлены в [1, 5, 20, 29]. По данным проведенных

испытаний оправдываемость прогнозов высоты волн для этих акваторий, оцениваемая в соответствии с действующим Наставлением [3], изменялась от 87,3–94,6 % для прогнозов на первые сутки, до 71,6–81,1 % для прогнозов на пятые сутки. Снижение качества прогнозов с увеличением заблаговременности в значительной степени определялось увеличением ошибок прогностических данных о скорости ветра, используемых в качестве входной информации в расчетной модели ветрового волнения.

В данной статье излагаются результаты испытания прогностической системы, проведенного для акватории Мирового океана.

1. Система прогнозирования

1.1. Волновая модель и расчетные параметры

В системе прогнозирования ветрового волнения, развиваемой в ФГБУ «Гидрометцентр России», в качестве расчетного ядра используется одна из спектральных моделей, известная под названием WaveWatch III v 3.14 [24]. Расчет осуществляется путем интегрирования уравнения для спектральной плотности волнового действия $N(f, \theta; \lambda, \phi, t)$, являющейся функцией частоты $f = \sigma / 2\pi$, направления распространения θ , географических координат (λ, ϕ) и времени t .

Для случая, в котором не учитывается зависимость поля волн от средних течений (связанные с течениями доплеровские эффекты), расчетное уравнение в сферической системе координат записывается следующим образом [24]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma}, \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta}{R}, \quad (2)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta}{R \cos \phi}, \quad (3)$$

$$\dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s}, \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m}, \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R}, \quad (6)$$

где λ – географическая долгота; ϕ – широта; R – радиус Земли; k – волновое число, связанное с частотой $\sigma = 2\pi f$ дисперсионным соотношением для линейных волн $\sigma^2 = gk \tanh kd$; d – глубина моря; g – ускорение свободного падения; S – координата в направлении θ ; m – координата в направлении, нормальном к θ ; $c_g = \partial \sigma / \partial k$ – групповая скорость, определяемая из того же дисперсионного соотношения; S – совокупный вклад источников и стоков энергии волн в различных спектральных диапазонах (ветровая накачка, диссипация, нелинейные взаимодействия, придонное трение и др.).

Из множества предлагаемых в пакете WaveWatch III вариантов описания различных механизмов развития и эволюции волн (представляемых членом источников S) выбран вариант параметризации ветрового воздействия и диссипации WAM4 с набором параметров WAJ [24].

Расчетная область той части прогностической системы, которая обеспечивает составление прогнозов для акватории Мирового океана, построена по данным цифрового массива ETOPO [7]. Для задания береговой линии использовалась выборка из набора географических полигонов GSHHS (Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shorelines) с разрешением, соответствующим масштабу карты 1:250000 [28].

Расчет проводится на регулярной широтно-долготной сетке с шагами $\Delta\lambda = 0,5^\circ$, $\Delta\phi = 0,5^\circ$ ($\sim 50 \times 50$ км) для основной части области, $\phi = 87^\circ$ ю. ш. – 78° с. ш.; и на сопряженной с основной сетке с шагами $\Delta\lambda = 0,25^\circ$, $\Delta\phi = 0,1^\circ$ ($\sim 10 \times 10$ км) для Арктического бассейна, $\phi = 66$ – 83° с. ш. Непрерывный волновой спектр $N(\sigma, \theta; \lambda, \phi, t)$ аппроксимируется 24 дискретными направлениями распространения θ_k с равномерным шагом $\Delta\theta = 15^\circ$ и 25 дискретными частотами $f_l = \sigma_l / 2\pi$, задаваемыми членами геометрической прогрессии с начальным значением 0,042 Гц и знаменателем 1,1. Получаемая в результате

расчетов спектральная плотность волнового действия $N(f_i, \theta_k; \lambda, \phi, t)$ служит исходной для определения производных величин, представляющих практический интерес для потребителей морской информации, таких как высота значительных волн (англ. significant wave height, SWH), средние по спектру периоды и длины волн, направления распространения ветровых волн и волн зыби, пиковые частоты волн и др.

1.2. Источники входной информации

Входной информацией для модели ветрового волнения, помимо батиметрических данных, использовавшихся для конфигурирования расчетной области, служат метеорологические данные о скорости ветра (приведенной к высоте 10 м), температуре воды и воздуха, а также сведения о сплоченности морских льдов, оказывающих существенное влияние на развитие волн. При сплоченности свыше 5 баллов развитие волн полагается полностью подавляющимся.

В качестве источника метеорологических данных используется продукция двух глобальных прогностических моделей – ПЛАВ и GFS. Полулагранжева модель ПЛАВ, разработанная в Гидрометцентре России совместно с ИВМ РАН [6], решением ЦМКП Росгидромета от 2.04.2009 г. рекомендована к внедрению в Гидрометцентре России для прогноза полей приземного ветра. Горизонтальное разрешение метеорологических полей составляет $\sim 0,9^\circ \times 0,7^\circ$; дискретность по времени – 3 часа.

Выходная продукция системы GFS (Global Forecasting System), функционирующей в метеорологическом центре NCEP/NOAA (США) [17], поступает в оперативном режиме в Гидрометцентр России по специализированным каналам (Интернет-2). Горизонтальное разрешение этих данных составляло $\sim 0,2^\circ \times 0,2^\circ$ (~ 27 км) до 14.01.2015 г. и $\sim 0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (~ 13 км) с 15.01.2015 г.; дискретность по времени – 3 часа.

Дублирование источников метеорологического прогноза предусмотрено для повышения надежности функционирования системы прогнозирования волнения. При поступлении оперативных данных из нескольких метеорологических систем приоритет отдается продукции с более высокими характеристиками оправдываемости прогнозов полей ветра по данным регулярного мониторинга их качества.

В качестве источников требуемой в зимний сезон информации о состоянии ледового покрова (общей сплоченности морского льда)

используются цифровые данные о распределении льдов, получаемые в результате совместного анализа данных спутниковых и контактных наблюдений в Мировом океане. Такие данные распространяются на регулярной основе через FTP-сервер Отдела моделирования и анализа морской среды NCEP/NOAA [12]. Распределение сплоченности льда, относящееся к моменту времени старта прогноза, переинтерполируется из исходной на сетку волновой модели и полагается не меняющимся со временем на всем прогностическом интервале.

2. Период испытаний, данные наблюдений и показатели качества прогнозов

Испытания проводились в период с 1.10.2014 г. по 30.09.2015 г. В ходе испытаний ежедневно составлялись прогнозы на сроки до 120 ч от исходного срока 00 ч ВСВ. Прогнозы составлялись в двух вариантах — с использованием метеорологических данных из моделей ПЛАВ и GFS. В качестве начальных условий для интегрирования волновой модели в каждом прогностическом сеансе использовались данные предшествующего прогноза спектров $N(f, \theta; \lambda, \phi, t)$ на 24 ч. Всего составлено 365 прогнозов.

Прогностические расчеты выполнялись на РСК Торнадо с периодичностью выдачи прогностических результатов 3 ч в качестве выходной продукции системы и 15 мин для определения показателей оправдываемости.

Качество прогнозов оценивалось путем сопоставления прогностических значений SWH с данными наблюдений двух типов: спутниковых (альтиметрических) измерений из базы данных RADS (Radar Altimeter Database System), поддерживаемой в Дельфтском институте исследований Земли из космоса (Delft Institute for Earth-Oriented Space research — DEOS) [18], и данных волновых буев (<http://www.ndbc.noaa.gov/>).

В период испытаний альтиметрические измерения регулярно поступали с трех спутников: Cryosat-2, Jason-2 и Saral. Для рассматриваемого годового периода из базы данных выбрано около 48 млн альтиметрических измерений SWH. Спутниковые данные по высоте ветровых волн имеют довольно высокую точность, сопоставимую с точностью контактных наблюдений, проводимых с помощью волновых буев (табл. 1).

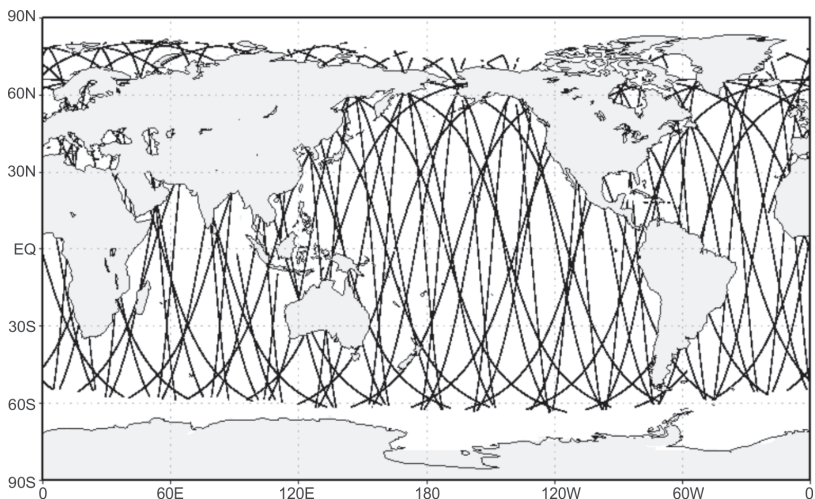
**Оценки точности альтиметрических данных о высоте ветровых волн
по литературным источникам**

Спутник	Район	Погрешность	Источник
Торех / Poseidon	Тихий океан у Японии	0,50–0,54 м	Ebuchi, Kawamura, 1994 [10]
Торех / Poseidon	У западного побережья Канады	0,30–0,35 м	Gower, 1996 [11]
Торех / Poseidon	Мексиканский залив	0,15–0,18 м	Hwang et al., 1998 [13]
ERS-1	Мировой океан	3–5 %	Tolman, 2002 [23]
Jason-1	Мировой океан	max (0,4 м, 10 %)	Picot et al., 2003 [16]
ERS-2, Торех/ Poseidon	Северное, Балтийское моря	0,3–0,4 м	Sølvsteen & Hansen, 2006 [19]
ERS-2, ENVISAT	Мировой океан	6–6,5 %	Janssen et al., 2007 [15]
Jason-1, Jason-2 ENVISAT RA-2	Мировой океан	около 5,4 %	Abdalla et al., 2010 [8]

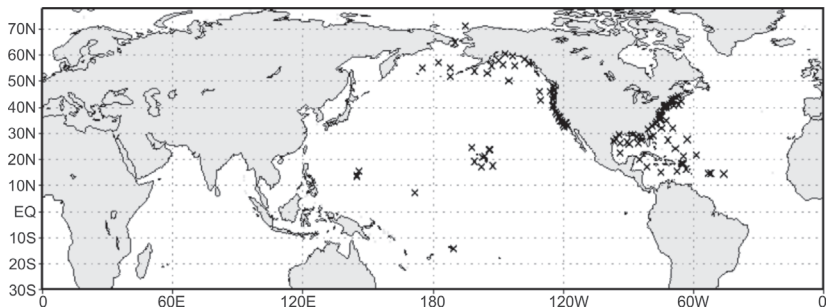
Данные второго типа наблюдений представляют собой выборки из рядов контактных измерений SWH на 120 волновых буях, установленных главным образом в Северном полушарии. Дискретность измерений на большинстве буев составляет 1 час, а номинальная точность 0,2 м. Примеры географического распределения данных обоих типов наблюдений представлены на рис. 1.

Для количественной оценки качества прогнозов высоты волн использовались такие показатели, как оправдываемость прогноза Опр, рассчитываемая в соответствии с Наставлением [3], а также средние ошибки: СО – средние отклонения прогностических значений от наблюдаемых (смещения), СКО – среднеквадратичные ошибки, Кор – коэффициенты корреляции между измеренными и прогностическими значениями.

Вначале для получения поточечных коллокаций «прогноз-наблюдение» применяется линейная пространственно-временная интерполяция прогностических полей SWH на точки и время измерений.



а)



б)

Рис. 1. Пример распределения альтиметрических измерений высоты волн для суточной порции данных наблюдений RADS за 30.09.2015 г. (а) и положение волновых буйев, данные которых использовались для оценки качества прогнозов в период испытаний 1.10.2014 г. – 30.09.2015 г. (б).

При этом каждому наблюдению ставится в соответствие несколько (до пяти) прогностических значений с разной заблаговременностью. Затем полученные таким образом разности прогностических и наблюдаемых значений группируются по суточным интервалам заблаговременности (0–24 ч, 24–48 ч, 48–72 ч, 72–96 ч, 96–120 ч), для которых

вычисляются перечисленные критерии оправдываемости прогнозов, характеризующие вариации точности прогнозов SWH от первых к пятым суткам прогноза.

3. Результаты испытаний

3.1. Оценки прогнозов относительно спутниковых и буйковых данных

Показатели качества прогнозов высоты волн, составленных с использованием метеорологических данных GFS за весь период испытаний 1.10.2014 г. – 30.09.2015 г. и оцениваемых относительно двух источников данных наблюдений, спутниковых и буйковых, представлены в табл. 2. Статистики, обозначаемые в строках «спутниковая альтиметрия», подсчитаны с использованием данных всех трех спутников Cryosat-2, Jason-2 и Saral, поставивших данные в базу RADS.

Таблица 2

Показатели качества прогнозов высоты волн SWH, составленных с использованием метеорологических данных GFS и оцениваемых относительно альтиметрических и буйковых данных за период 1.10.2014 г. – 30.09.2015 г.

Сутки прогноза	Наблюдательная система	Число сравнений, млн	СО, м	СКО, м	Кор	Опр, %
1	Спутниковая альтиметрия	48,580	0,23	0,53	0,94	88,3
	Волновые буй	1,007	0,13	0,47	0,90	90,2
2	Спутниковая альтиметрия	48,484	0,23	0,56	0,94	87,6
	Волновые буй	1,003	0,14	0,49	0,89	89,4
3	Спутниковая альтиметрия	48,309	0,23	0,61	0,92	86,3
	Волновые буй	1,001	0,14	0,52	0,88	88,3
4	Спутниковая альтиметрия	48,173	0,22	0,68	0,90	84,2
	Волновые буй	0,997	0,14	0,56	0,85	87,0
5	Спутниковая альтиметрия	48,033	0,21	0,78	0,86	81,3
	Волновые буй	0,993	0,14	0,61	0,82	85,1

Средние значения ошибок прогнозов (смещения) слабо зависели от заблаговременности, составляя 0,21–0,23 м и 0,13–0,14 м относительно спутниковых и буйковых данных соответственно. Преобладание положительных смещений свидетельствовало о систематическом завышении прогностических высот волн по отношению к измерениям обоих типов.

Среднеквадратичные ошибки SWH монотонно увеличивались с ростом заблаговременности от примерно 0,5 м для прогнозов на первые сутки до 0,6–0,8 м для прогнозов на пятые сутки. Среднеквадратичные ошибки относительно данных волновых буев были несколько ниже (примерно на 0,1 м), чем относительно альтиметрических данных.

Коэффициенты корреляции между прогностическими и измеренными значениями SWH имели довольно высокие значения (0,9 или больше) для малых заблаговременностей (1–3 суток), уменьшаясь до 0,82–0,86 на пятые сутки.

Рассчитываемая в соответствии с Наставлением [3] оправдываемость прогнозов монотонно уменьшалась с ростом заблаговременности, составляя 85–90 % при сопоставлении с данными контактных измерений и 81–88 % при сопоставлении со спутниковыми данными.

3.2. Зависимость от источника метеорологических данных

В табл. 3 представлены показатели качества прогнозов, составленных с использованием двух источников метеорологических данных, ПЛАВ и GFS, за период 15.03.2015 г. – 30.09.2015 г. Ошибки прогнозов подсчитывались относительно данных трех спутников – Cryosat-2, Jason-2 и Saral. Сравнение прогнозов, составленных с использованием разных метеорологических данных, позволяет сделать обоснованный выбор источника для получения наилучших прогнозов ветровых волн.

Как видно из табл. 3, смещение прогностических значений относительно наблюдений имеет разные знаки для прогнозов по ПЛАВ и GFS – систематическое завышение с данными GFS и систематическое занижение с данными ПЛАВ. В терминах среднеквадратических ошибок и коэффициента корреляции прогнозы по GFS получаются точнее, чем по ПЛАВ, тогда как оправдываемость по ПЛАВ оказывается более высокой, чем по GFS.

Показатели качества прогнозов высоты волн SWH, составленных с использованием двух источников метеорологических данных, ПЛАВ и GFS, и оцениваемых относительно альтиметрических данных за период 15.03.2015 г. – 30.09.2015 г.

Сутки прогноза	Источник данных	Число сравнений, млн	СО, м	СКО, м	Кор	Опр, %
1	ПЛАВ	26,479	-0,31	0,57	0,95	94,8
	GFS	26,479	0,21	0,52	0,95	89,6
2	ПЛАВ	26,336	-0,34	0,61	0,94	93,5
	GFS	26,478	0,21	0,55	0,94	88,9
3	ПЛАВ	26,196	-0,37	0,68	0,92	90,8
	GFS	26,476	0,21	0,61	0,93	87,5
4	ПЛАВ	26,057	-0,40	0,77	0,89	87,2
	GFS	26,473	0,22	0,69	0,90	85,2
5	ПЛАВ	25,919	-0,42	0,87	0,85	83,2
	GFS	264,698	0,22	0,79	0,87	82,1

В целом можно считать, что оба рассмотренных источника метеорологической информации обеспечивают сопоставимую точность прогнозов.

3.3. Сравнение с другими прогностическими системами

В Российской Федерации в настоящее время, помимо рассматриваемой, действует две системы прогноза ветрового волнения для океанских акваторий, прошедшие сертификацию Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП):

а) Оперативный глобальный прогноз волнения по модели ААНИИ (AARI-PD2). Решение ЦМКП от 16.05.2008 г. Прогноз составляется на сетке $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ с использованием данных метеорологического прогноза скорости ветра по спектральной модели T169L31.

б) Метод прогноза смешанного волнения на дальневосточных морях и в Тихом океане (Северное полушарие), разработанный в

ДВНИГМИ. Решение ЦМКП от 02.04.2009 г. Прогноз составляется на сетке $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ с использованием данных метеорологического прогноза атмосферного давления на уровне моря метеослужбы Великобритании.

Для первой из указанных систем (AARI-PD2) был получен набор статистик, аналогичный по составу и процедурам расчета рассмотренному выше набору для испытываемой системы. Поскольку в модели AARI-PD2 рассчитывается средняя высота волн, то для ее пересчета в SWH применялся коэффициент 1,6. Сравнение прогнозов по двум системам представлено в табл. 4. Показатели качества прогнозов в обоих случаях подсчитывались по отношению к альтиметрическим данным трех спутников – Cryosat-2, Jason-2 и Saral – за весь период испытаний 01.10.2014 г. – 30.09.2015 г.

Таблица 4

**Показатели качества прогнозов высоты волн SWH,
в двух прогностических системах: Гидрометцентра России и AARI-PD2
за период 01.10.2014 г. – 30.09.2015 г.**

Сутки прогноза	Прогностическая система	Число сравнений, млн	СО, м	СКО, м	Корр	Опр, %
1	ГМЦ	48,580	0,23	0,53	0,94	88,3
	AARI-PD2	49,644	-0,49	0,94	0,83	73,7
2	ГМЦ	48,444	0,23	0,56	0,94	87,6
	AARI-PD2	48,688	-0,49	1,00	0,79	71,3
3	ГМЦ	48,309	0,23	0,61	0,92	86,3
	AARI-PD2	47,447	-0,47	1,05	0,75	68,6
4	ГМЦ	48,173	0,22	0,68	0,90	84,2
	AARI-PD2	22,408	-0,45	1,10	0,72	66,9

Как видно из табл. 4, по всем показателям качество прогнозов рассматриваемой системы заметно выше, чем прогнозов AARI-PD2.

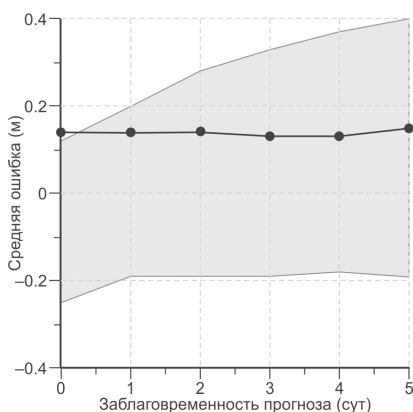
По данным публикации автора системы (б) [25], прогнозы SWH в северной части Тихого океана на сроки 12–72 ч характеризуются значениями СКО около 0,8 м и коэффициентами корреляции 0,73–0,75.

По этим показателям качество прогнозов рассматриваемой системы для указанной части Мирового океана также оказывается выше.

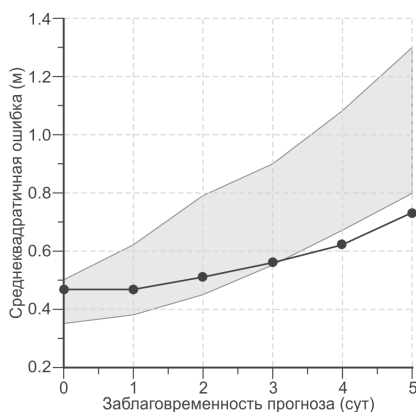
Для сопоставления точности прогностической продукции рассматриваемой системы и систем зарубежных центров удобно воспользоваться результатами мониторинга качества прогнозов ветрового волнения, проводимого Совместной комиссией (ВМО и МОК) по океанографии и морской метеорологии [9]. По принятой процедуре ежеквартально оцениваются показатели оправдываемости для фиксированных заблаговременностей прогнозов: 0, 24, 48, 72, 96 и 120 ч. В качестве эталона используются измерения на волновых буях, предварительно осредненные с 4-часовым временным окном, центрированным на моментах времени, соответствующих указанным прогностическим интервалам.

В соответствии с этим были рассчитаны по аналогичной процедуре величины CO , CKO и Kop на выборке прогнозов SWH рассматриваемой системы и данным волновых буев (рис. 1) за январь – март 2015 г., которые сопоставляются с результатами, приведенными в бюллетене [14] для других 10 систем.

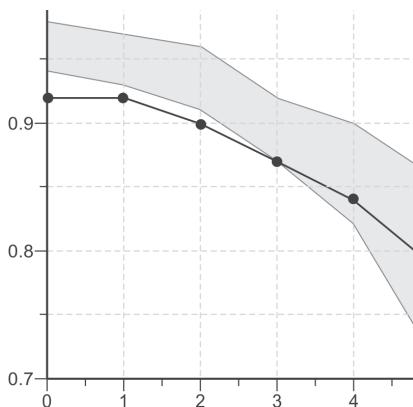
Сравнение с зарубежными системами прогнозирования ветрового волнения, показанное на рис. 2, свидетельствует о том, что показатели качества системы Гидрометцентра России в целом не уступают таковым для зарубежных систем.



2а



2б



2в

Рис. 2. Зависимость смещения (а), среднеквадратического отклонения (б) и коэффициента корреляции (в) от заблаговременности прогноза SWH для системы Гидрометцентра России (линия) и диапазон изменчивости указанных характеристик по данным [14] для 10 моделей зарубежных центров (заливка).

Заключение

На основе рассмотрения результатов испытаний на своем заседании 28.03.2016 г. ЦМКП Росгидромета рекомендовала «Систему прогнозирования характеристик ветрового волнения в Мировом океане» к использованию в качестве основной технологии прогнозирования характеристик ветрового волнения в Мировом океане, отметив, что эта система является существенным развитием комплексной технологии оперативного прогнозирования ветрового волнения в океанах и морях России (решения ЦМКП от 27.03.2012 г. и 17.06.2013 г.), а также то, что получаемая прогностическая продукция, наряду с непосредственным использованием, обеспечивает получение информации, необходимой для встраиваемых подсистем детализированного прогноза волнения в окраинных морях Российской Федерации.

Информационная продукция прогностической системы распространяется на регулярной основе посредством интернет-технологий: в цифровом виде — через систему распределенных баз данных ЕСИМО и в графической форме через сайт <http://hmc.meteorol.ru/sea/index.html>. Соответствующее веб-приложение дает возможность просматривать «мгновенные» поля основных параметров ветрового волнения на интервале прогноза 0–120 ч с дискретностью 3 ч, а также их анимацию как для всего Мирового океана, так и для его частей.

Список литературы

1. Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. Исследования океанов и морей. – 2014. – Вып. 215. – С. 90–101.
2. Лавренов И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. – СПб: Гидрометеоиздат, 1998. – 499 с.
3. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. – М.: Триада ЛТД, 2011. – 201 с.
4. Справочные данные по режиму ветра и волнения шельфа Баренцева и Карского морей. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. – 334 с.
5. Струков Б.С., Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. – 2013. – С. 64–79.
6. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 4. – С. 5–16.
7. Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis // NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. – 2009. – doi:10.7289/V5C8276M.
8. Abdalla S., Janssen P. A.E.M., Bidlot J.-R. Jason-2 OGDR Wind and Wave Products: Monitoring, Validation and Assimilation // Marine Geodesy. – 2010. – Vol. 33. Suppl. 1. – P. 239–255. – DOI: 10.1080/01490419.2010.487798.
9. Bidlot J.R., Holt M.W. Verification of operational global and regional wave forecasting systems against measurements from moored buoys // JCOMM Technical Report No. 30. – 2006. – 15 p.
10. Ebuchi N., Kawamura H. Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan // Journal of Oceanography. – 1994. – Vol. 50(4). – P. 479–487.
11. Gower J.F.R. Intercalibration of wave and wind data from TOPEX/POSEIDON and moored buoys off the west coast of Canada // J. Geoph. Res. – 1996. – Vol. 101 (C2). – P. 3817–3829.
12. Grumbine R.W. Automated Passive Microwave sea ice concentration analysis at NCEP // NCEP/NOAA. Technical Note No 120. – 1996. – 13 p.
13. Hwang P.A., Teague W.J., Jacobs G.A., Wang D.W. A statistical comparison of wind speed, wave height and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region // J. Geoph. Res. – 1998. – Vol. 103. – P. 10451–10468.
14. Intercomparison of operational wave forecasting systems against buoys: January 2015 to March 2015 JCOMM. May 2015. – <http://www.jcomm.info>
15. Janssen P.A.E.M., Abdalla S., Hersbach H., Bidlot J.-R. Error Estimation of Buoy, Satellite, and Model Wave Height Data // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2007. – Vol. 24. – P. 1665–1677.

16. *Picot N., Case K., Desai S., Vincent P.* “AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products”, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC). – 2003. – 107 p.
17. Product Description Document: NCEP Model Analyses & Guidance. July 2013. Available at http://products.weather.gov/PDD/NCEP_PDD_MAG.pdf
18. *Scharroo R., Leuliette E.W., Lillibridge J.L., Byrne D., Naeije M.C., Mitchum G.T.* RADS: Consistent multi-mission products // Proc. of the Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry, Venice, 20–28 September 2012, Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-710. – 2013. – 4 p.
19. *Sølvsteen C., Hansen C.* Validation of the operational wave models WAVEWATCH-III and Mike21-OSW against satellite altimetry and coastal buoys FARVANDSVÆSENET Royal Danish Administration of navigation and Hydrography NR K.4. – March 2006. – 52 p.
20. *Strukov B.S., Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L.* Verification of the Wind Wave Forecasting System for the Black, Azov and Caspian Seas // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. – Report No. 42. – May 2012. – P. 08-05–08-06.
21. The SWAN team, SWAN user manual. – 2010. – <http://www.swan.tudelft.nl>.
22. *Tolman H.L.* Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain // NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note No 213. – 2002. – 33 p.
23. *Tolman H.L.* Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note Nr. 213. – 2002. – 33 p.
24. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14 // NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note No 276. – 2009. – 194 p. Available at <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>.
25. *Vrazhkin A.N.* Application of spectral wave model for some areas of the Far Eastern Seas and the Pacific Ocean // Pacific Oceanography. – 2013. – Vol. 6, No. 1. – P. 5–9.
26. WAMDI group: *Hasselmann S., Hasselmann K., Bauer E., Janssen P.A.E.M., Komen G.J., Bertotti L., Lionello P., Guillaume A., Cardone V.C., Greenwood J.A., Reistad M., Zambresky L., Ewing J.A.* The WAM model – a third generation ocean wave prediction model // J. Phys. Oceanogr. – 1988. – Vol. 18. – P. 1775–1810.
27. *Weatherall P., Marks K.M., Jakobsson M., Schmitt T., Tani S., Arndt J.E., Rovere M., Chayes D., Ferrini V., Wigley R.* A new digital bathymetric model of the world's oceans // Earth and Space Science. – 2015. – Vol. 2. – P. 331–345. – doi: 10.1002/2015EA000107.
28. *Wessel P., Smith W.H.F.* A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // J. Geophys. Res. – 1996. – Vol. 101 (B4). – P. 8741–8743.
29. *Zelenko A.A., Strukov B.S., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L.* Verification of the wind wave forecasting system for the Baltic sea // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. – WCRP Report No. 12/2015. – 2015. – P. 8-23–8-24.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Багров А.Н.</i> Новая технология циклического усвоения данных на основе схемы анализа 3D-VAR	3
<i>Розинкина И.А., Багров А.Н., Астахова Е.Д., Цветков В.И., Пономарева Т.Я., Михайлов А.Ю., Алферов Ю.В., Никитин А.Е., Шатунова М.В., Васькова Д.В., Копейкин В.В.</i> Глобальный прогноз до 10 суток на основе спектральной модели Гидрометцентра России Т339L31 метеорологических полей и результаты испытаний	13
<i>Вербицкая Е.М., Романский С.О.</i> Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW «ХАБ-15» в пунктах Дальневосточного региона России	32
<i>Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Багров А.Н., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В., Цветков В.И.</i> Система ансамблевого глобального прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 240 часов: результаты оперативных испытаний	63
<i>Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Лукьянов В.И., Голубев А.Д., Васильева Е.Л., Мищенко С.Л.</i> Метод прогноза опасного природного явления – аномально холодной погоды на 48-44 часа для территории России и результаты его испытания	80
<i>Гончарова Т.А., Лебедева В.М., Федотова Л.В.</i> Результаты испытания динамико-статистических методов прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя в Северо-Кавказском УГМС	94
<i>Старостина Т.В., Медведева Н.В.</i> Результаты испытания методов прогноза урожайности ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по Омской области	106
<i>Кулаков М.Ю., Ашик И.М., Фильчук К.В.</i> Технология расчета и краткосрочного прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей	114
<i>Зеленько А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д.</i> Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане	133

Новая технология циклического усвоения данных на основе схемы анализа 3D-VAR / Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Гайфулин Д.Р., Горбунов М.Е., Багров А.Н. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 3–12.

Кратко излагается новая технология глобального циклического усвоения данных (ЦУД) полей метеозлементов. Технология разработана в ФГБУ «Гидрометцентр России» и основана на трехмерном вариационном усвоении метеорологических данных по методу 3D-VAR. Она позволяет усваивать практически все виды существующих метеорологических наблюдений. При этом усваивается свыше 1 млн разнообразных спутниковых данных в сутки. Приведены результаты оперативных испытаний новой технологии ЦУД в период с февраля 2014 г. по апрель 2015 г., т. е. результаты прогноза глобальной полулагранжевой модели атмосферы, стартующей от продуцируемых новой системой ЦУД полей анализа. Проверка прогнозов проводилась по синоптическим и аэрологическим наблюдениям на территории Европы и показала преимущество новой технологии ЦУД.

ЦМКП решением от 24.06.2015 г. рекомендовала внедрить новую технологию ЦУД в оперативную эксплуатацию в ФБГУ «ГВЦ Росгидромета», ФБГУ «Гидрометцентр России» в качестве резервной технологии.

Ил. 4. Библ. 6.

Глобальный прогноз до 10 суток на основе спектральной модели Гидрометцентра России Т339L31 метеорологических полей и результаты испытаний / Розинкина И.А., Багров А.Н., Астахова Е.Д., Цветков В.И., Пономарева Т.Я., Михайлов А.Ю, Алферов Ю.В., Никитин А.Е., Шатунова М.В., Васькова Д.В., Копейкин В.В. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 13-31.

Приводится краткая характеристика и обсуждаются результаты испытаний (ноябрь 2013 г. - август 2014 г.) новой технологии Гидрометцентра России выпуска глобальных численных прогнозов до 10 суток по гидродинамической модели атмосферы Т339L31, 339 сферических гармоники, шаг сетки ~35 км. Особенность данной технологии заключается в том, что пространственное разрешение новой версии модели атмосферы позволило впервые в отечественной практике глобального моделирования явно описать в гидростатическом приближении отдельные мезомасштабные атмосферные циркуляции диаметром 100–200 км, в класс которых попадают важные для прогнозирования зарождающиеся тропические циклоны и арктические мезоциклоны. Анализируются примеры. Приводятся оценки успешности прогнозов по новой технологии в сравнении с успешностью результатов других численных технологий, доступных специалистам Росгидромета. Приводятся формулировки решения ЦМКП о особенностях новой технологии и целесообразности внедрения данной прогностической технологии в оперативную практику Росгидромета.

Табл. 5. Ил. 8. Библ. 4.

Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW «ХАБ-15» в пунктах Дальневосточного региона России / Вербицкая Е.М., Романский С.О. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 32–62.

Приведены результаты оперативно-производственных испытаний прогноза элементов погоды (срочных температур воздуха у Земли, суточных экстремумов температуры воздуха у Земли, скорости и направления приземного ветра, наличия и количества полусуточных сумм осадков) в пунктах Дальневосточного региона России, рассчитанных по данным модели WRF-ARW с горизонтальным разрешением 15 км. Заблаговременность прогнозов до 72 ч. Приведено краткое описание используемой версии модели WRF-ARW, системы численных прогнозов погоды РСМЦ в Хабаровске, построенной на базе этой модели, дан перечень и формы представления выпускаемой продукции. Представлен анализ поведения оценок качества прогнозов в зависимости от сезонов года и климатических условий расположения станций. Выполнено сравнение полученных оценок с аналогичными данными других ГДМА для Европейской территории России, взятых из публикаций. На основании результатов испытаний даны рекомендации по использованию прогностической продукции модели в прогностической практике для каждого из 8 УГМС Дальневосточного региона России.

Табл. 11. Ил. 2. Библ. 5.

Система ансамблевого глобального прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 240 часов: результаты оперативных испытаний / Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Багров А.Н., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В., Цветков В.И. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 63–79.

В статье приводится краткое описание глобальной системы ансамблевого среднесрочного прогноза (САП), разработанной в ФГБУ «Гидрометцентр России», и обсуждаются результаты ее оперативных испытаний. Система ансамблевого прогноза основана на многократном интегрировании модели атмосферы от исходных данных, различающихся в пределах ошибки анализа. Необходимые наборы исходных данных для прогнозов подготавливаются с помощью бридинг-метода. В качестве основной модели в системе использована глобальная спектральная модель Гидрометцентра России T169L31 с разрешением 169 спектральных гармоник (шаг сетки по горизонтали около 70 км), треугольным усечением и 31 уровнем по вертикали. Дополнительно в ансамбле используется контрольный прогноз по глобальной модели ПЛАВ-2008 (разрешение около 70 км по горизонтали, 28 уровень по вертикали). Размер ансамбля – 14 реализаций. Неотъемлемой частью САП являются системы ансамблевого пост-процессинга и ансамблевой верификации. Результаты оперативных испытаний 2014 года показали удовлетворительное качество ансамблевых прогнозов Гидрометцентра России. Рекомендовано внедрить САП в качестве вспомогательного метода для составления кратко- и среднесрочных прогнозов погоды.

Табл. 1. Ил. 4. Библ. 21.

Метод прогноза опасного природного явления – аномально холодной погоды на 48–144 часа для территории России и результаты его испытания / Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Лукьянов В.И., Голубев А.Д., Васильева Е.Л., Мищенко С.Л. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 80–93.

Приводится краткое описание разработанного в ФГБУ «Гидрометцентр России» и реализованного на ЭВМ метода прогноза опасного природного явления (ОЯ) – аномально холодной погоды в холодные (отопительные) периоды. Прогностическая технология основана на системе расчета элементов погоды (РЭП) и предусматривает визуализацию для удобства работы с прогностическими материалами синоптиком-прогнозистом в виде таблиц и карт изолиний, а также коррекцию выходной продукции в отделе краткосрочных прогнозов погоды. Прогноз составляется по территориям, на которых предполагается возникновение ОЯ, и рассылается в адреса Членов правительственного штаба и территориальные управления Росгидромета. Приведены результаты оперативных испытаний метода в течение двух холодных сезонов: 2013/2014 гг. и 2014/2015 гг. Метод прогноза ОЯ и оценки успешности (результаты испытаний) докладывались на ЦМКП 3.12.2015 г., которая приняла решение внедрить метод в качестве основного в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России».

Табл. 4. Ил. 2. Библ. 3.

Результаты испытания динамико-статистических методов прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя в Северо-Кавказском УГМС / Гончарова Т.А., Лебедева В.М., Федотова Л.В. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 94–105.

Представлены результаты авторских и производственных испытаний в Северо-Кавказском УГМС методов оценки условий вегетации и прогноза урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя по 11 субъектам Южного и Северо-Кавказского федеральных округов с заблаговременностью 1–2 месяца.

Методы разработаны на основе длиннопериодной динамико-статистической модели продуктивности сельскохозяйственных культур. Структура базовой модели адаптирована к современным объемам исходной информации, параметры модели определялись с учетом климатических особенностей субъектов Российской Федерации.

Методы прогнозов урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя успешно прошли испытания и внедрены в Северо-Кавказском УГМС.

Табл. 4. Библ. 8.

УДК 63: 551.5

Результаты испытания методов прогноза урожайности ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по Омской области / Старостина Т.В., Медведева Н.В. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 106–113.

Приведены результаты испытания методов прогноза урожайности ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по Омской области, разработанных в рамках выполнения темы 1.1.7.1 и региональной темы 1.7.45 Плана НИОКР Росгидромета 2011–2013 гг. Технический совет ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» на заседании от 18 ноября 2015 г. и ЦМКП от 03 декабря 2015 г. рекомендовали к внедрению в оперативную практику ФГБУ «Омский ЦГМС» с 2016 года методы прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по отдельным муниципальным районам, ярового ячменя, овса, зерновых и зернобобовых культур по территории Омской области в качестве основных.

Табл. 2. Библ. 4.

УДК 551.467.3.03

Технология расчета и краткосрочного прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей / Кулаков М.Ю., Ашик И.М., Фильчук К.В. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 114–132.

Описаны основные характеристики новой технологии расчета и краткосрочного прогноза дрейфа льда на акватории Северного Ледовитого океана и арктических морей, разработанной на основании динамико-термодинамической модели совместной циркуляции вод и льдов. Приведены результаты ее верификации и применения.

Табл. 5. Ил. 5. Библ. 15.

УДК 551.466

Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане / Зеленко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д. // Информационный сборник № 43. – 2016. – С. 133–147.

Приводятся основные сведения о системе прогнозирования характеристик ветрового волнения для акватории Мирового океана. Представлены оценки точности прогнозов высоты волн на основе их сопоставления с данными двух наблюдательных систем: спутниковой альтиметрии и волновых буев. Полученные показатели качества прогнозов сопоставляются с аналогичными показателями других национальных разработок, прошедших ранее сертификацию ЦМКП Росгидромета, и оценками современных зарубежных прогностических систем. На основании полученных оценок качества прогнозов, указывающих на их высокую информативность, система рекомендована для оперативного применения.

Табл. 4. Ил. 2. Библ. 29.