

*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 → 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.

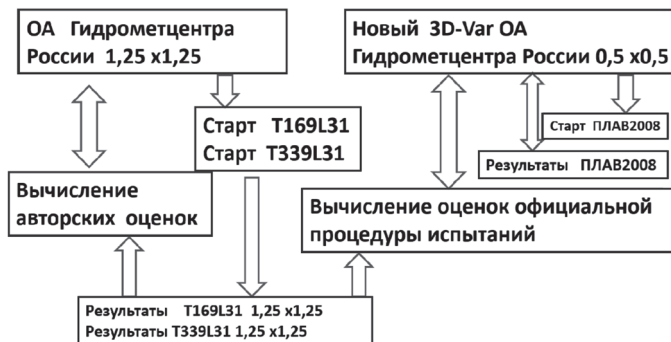


Рис. 1. Схема организации вычисления оценок успешности прогнозов в рамках оперативных испытаний новой версии модели T339L31.

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).

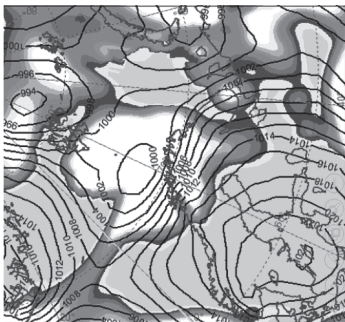
Как видно, модель с большим по горизонтали разрешением в сравнении с моделью T169L31 «сформировала» более близкие к реальности поле давления и зону штормовых ветров в Баренцевом море и на его побережии (в районе Мурманска по T339L31 и в поле ОА – около 13 м/с, а по T169L31 – всего 9 м/с).

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.

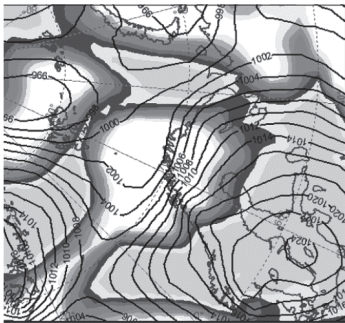
Рассмотренные факты нашли свое отражение в констатирующей части решения ЦМКП: «Ряд рассмотренных прогнозов полей давления при прохождении зарождающихся тропических циклонов и арктических мезоциклонов также свидетельствует о более близком к реальности моделировании процессов по T339L31».

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

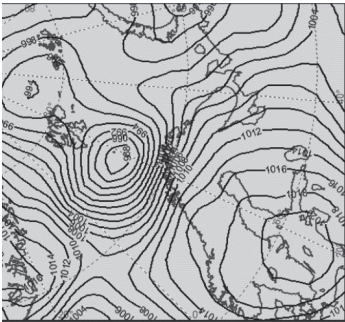


Рис. 2. Пример прогноза P_0 и облачности (верхний ряд рисунков) и $|U_{10}|$ (нижний ряд рисунков) арктических циклонов 4 апреля 2014 г. (заблаговременность 36 ч) в сравнении с данным OA (шаг $1,25^\circ \times 1,25^\circ$).

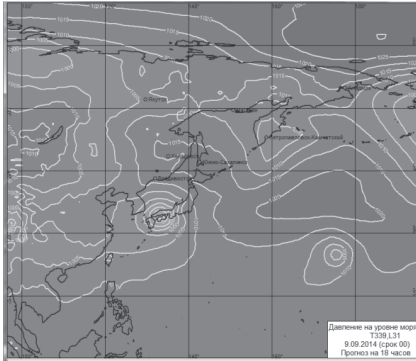
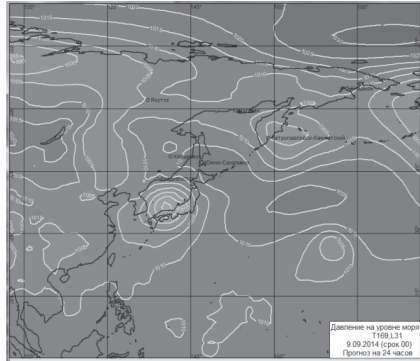
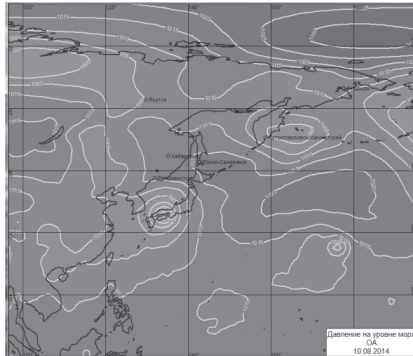
T339L31**T169L31****ОА**

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°)

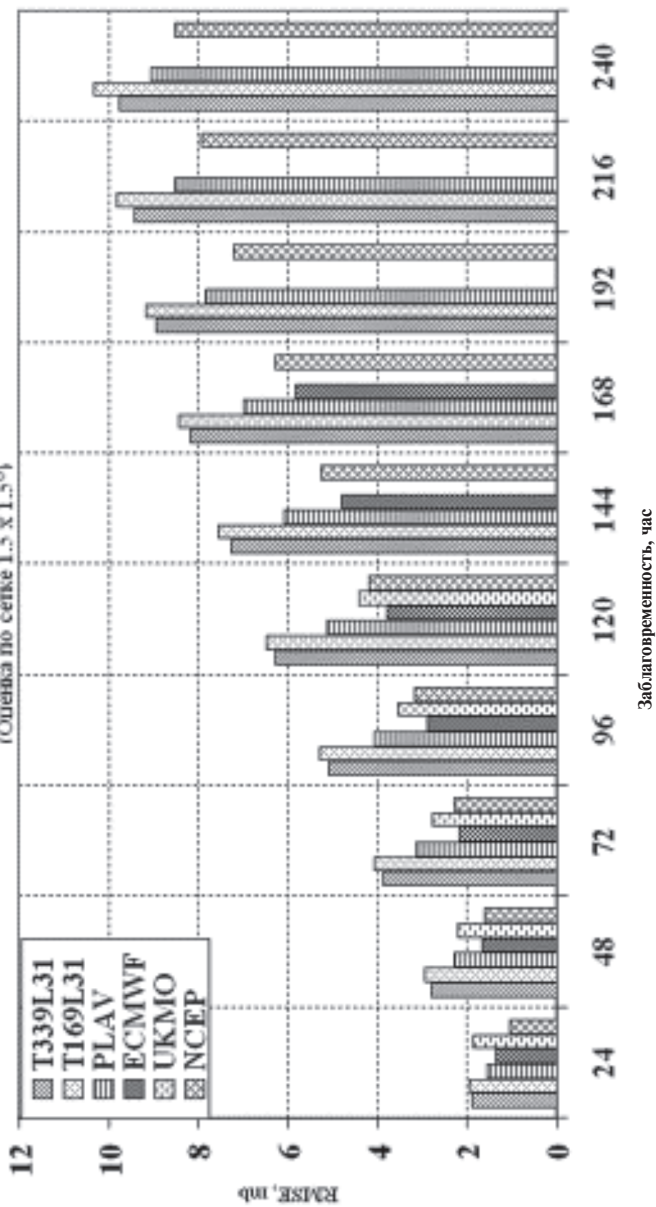


Рис. 4. Среднеквадратичные ошибки прогнозов давления на уровне моря.

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

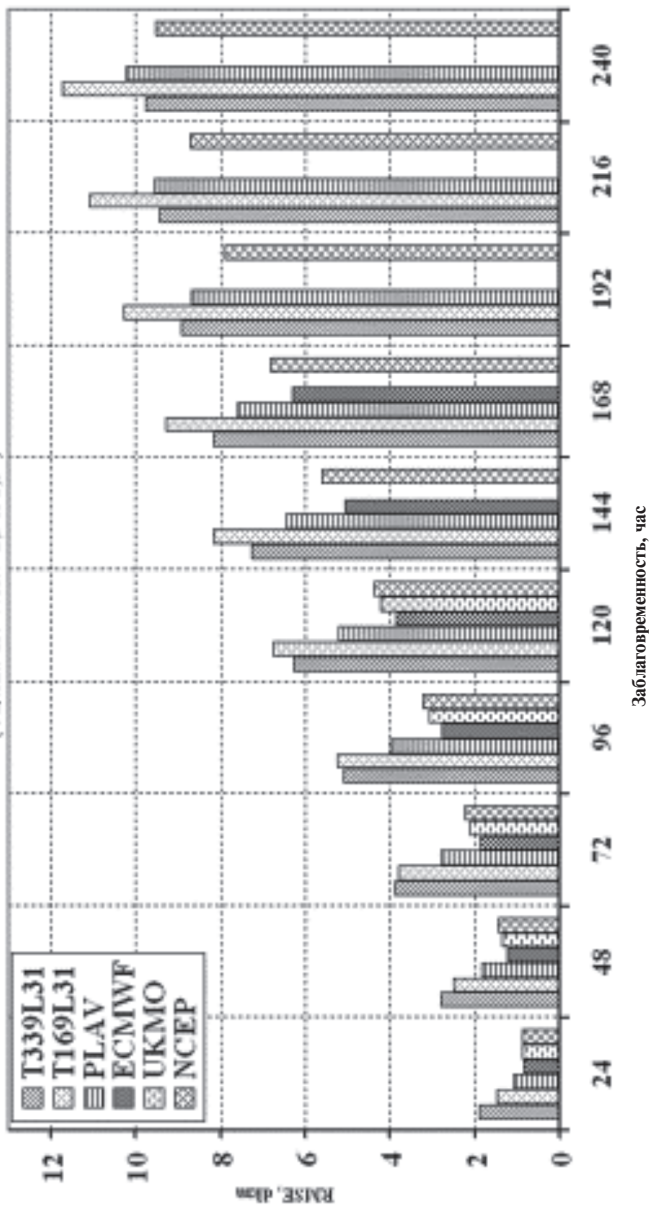


Рис. 5. Среднеквадратичные ошибки геопотенциальной высоты поверхности 500 ГПа.

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

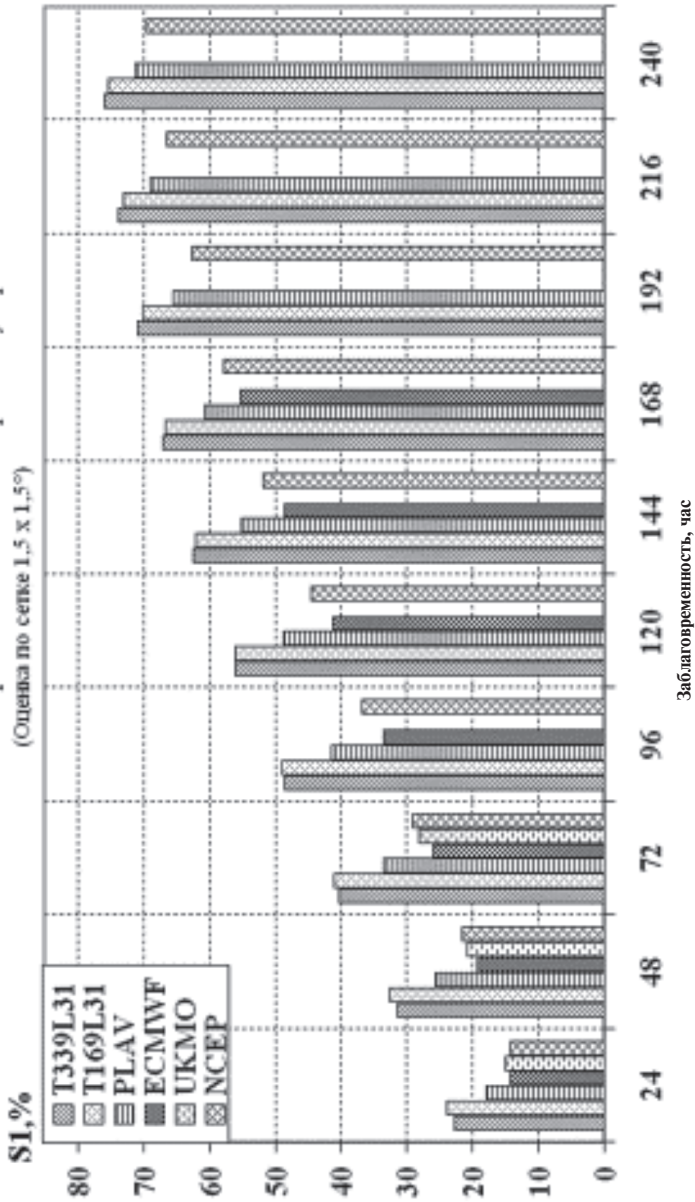


Рис. 6. Градиентные ошибки прогнозов геопотенциальной высоты поверхности 500 гПа.

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

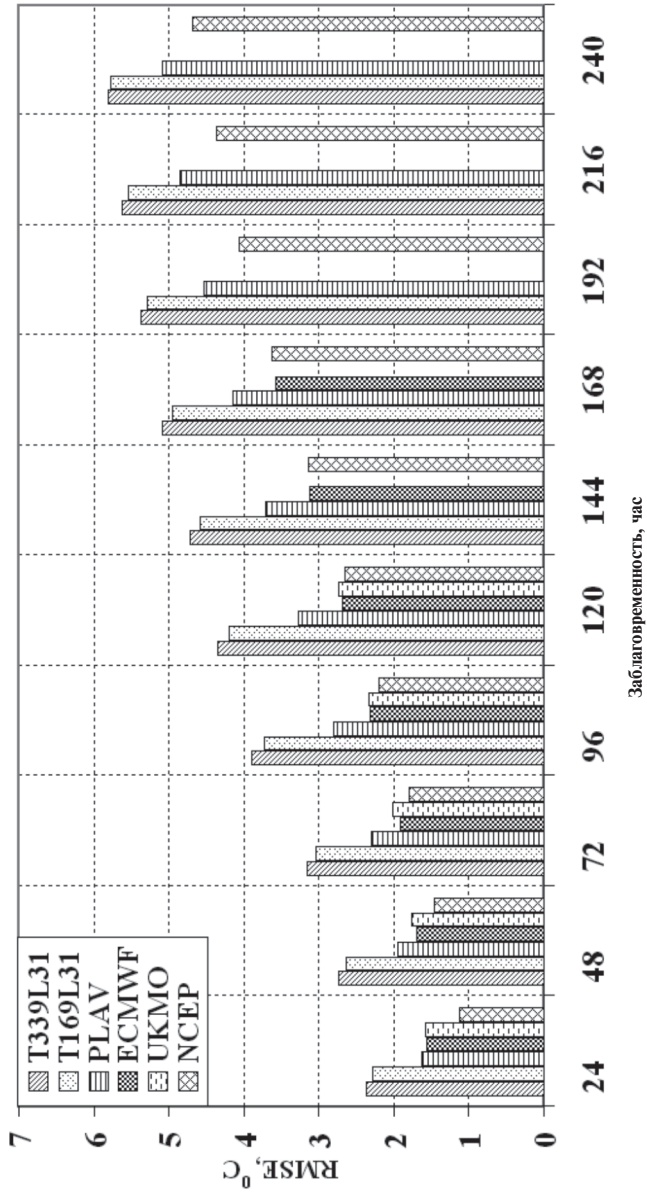


Рис. 7. Среднеквадратичные ошибки прогнозов температуры на поверхности 850 гПа.

График изменения среднеквадратической векторной ошибки прогноза $V_{\Sigma 250}$
 в зависимости от заблаговременности. Регион: Северное полушарие.
 (Оценка по сетке $1,5^{\circ} \times 1,5^{\circ}$)

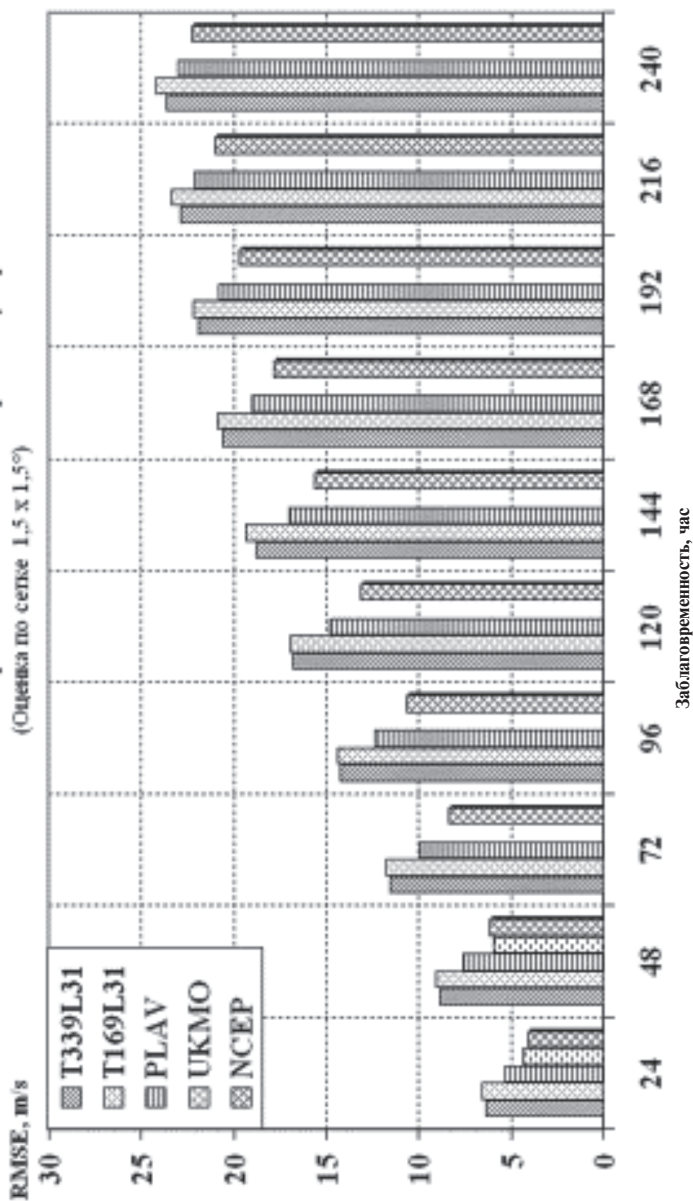


Рис. 8. Среднеквадратичные векторные ошибки прогнозов ветра на поверхности 250 гПа.

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.