

УДК 551.509.3(47+57-25)

Развитие систем детерминированного и ансамблевого численного прогнозирования погоды на основе глобальной спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России в 2009–2019 гг.

*И.А. Розинкина¹, Е.Д. Астахова¹, В.И. Цветков¹,
Ю.В. Алферов¹, Т.Я. Пономарева¹, А.Е. Никитин¹,
Д.В. Васькова¹, В.В. Копейкин¹, Е.В. Чурюлин^{1,2}*

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия*

Система численного прогноза погоды на основе глобальной спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России в период 2009–2019 гг. развивалась по следующим направлениям:

а) повышение пространственной детализации от Т85L31 с горизонтальным разрешением около 120×145 км в умеренных широтах к Т169L31 (60×72 км) и Т339L31 (30×36 км). Разрешение Т339L31 соответствует β-мезомасштабу, позволяя моделировать циркуляции барических образований размером до 150–200 км (тропических циклонов на ранних стадиях, арктических мезо-циклонов), что не удавалось выполнить на предшествующих версиях модели. Подготовлены версии модели с 63 вертикальными уровнями;

б) развитие системы ансамблевого прогнозирования: в 2015 г. введена в оперативный режим счета и выпуска графической продукции первая российская глобальная система среднесрочных ансамблевых прогнозов, включающая полный цикл вычислений и обработки данных, соответствующих требованиям ВМО к ансамблевым технологиям мировых метеорологических центров. С 2019 года, после существенных дополнений технологий автоматизированной обработки информации Гидрометцентра России, в сеть международного обмена стала поступать цифровая продукция ансамблевого прогнозирования ММЦ Москва;

в) создание технологии формирования данных на границах области вычислений для системы регионального численного краткосрочного прогноза COSMO-Ru в целях резервирования поступления зарубежной продукции. В 2018–2019 гг. на основе системы моделирования по Т339L31 был разработан и протестирован прототип такой технологии.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, ансамблевый прогноз погоды, спектральная модель атмосферы, оценки успешности прогнозов погоды, мезомасштабные процессы

Development of deterministic and ensemble numerical weather prediction systems based on the global spectral atmospheric model of the Hydrometcentre of Russia in 2009–2019

*I.A. Rozinkina¹, E.D. Astakhova¹, V.I. Tsvetkov¹,
Yu.V. Alferov¹, T.Ya. Ponomareva¹, A.E. Nikitin¹, D.V. Vaskova¹,
V.V. Kopeykin¹, E.V. Churiulin^{1,2}*

¹*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

In 2009-2019, the numerical weather prediction system based on the global spectral atmospheric model of the Hydrometcentre of Russia has been developed in the following directions: a) the increase in the spatial detailing from T85L31 with a 120×145 km horizontal resolution in the mid-latitudes to T169L31 (60×72 km) and T339L31 (30×36 km). The T339L31 resolution corresponds to the β -mesoscale and allows the model to reproduce the circulation of pressure formations as small as 200-300 km in size (tropical cyclones at their early stages, Arctic mesocyclones) which was not possible with the previous model versions. The model versions with 63 vertical levels have been prepared; b) the development of the ensemble prediction system: in 2015, the first Russian medium-range global ensemble prediction system was operationally implemented. It includes the full cycle of calculations and data processing meeting the WMO requirements for ensemble technologies used in the World Meteorological Centers. Since 2019, after significant additions to the automated data processing technologies of the Hydrometcentre of Russia, the WMC Moscow ensemble numerical products have been available in the international data exchange network; c) the development of the technology for the boundary data generation for the COSMO-Ru limited-area short-range numerical forecast system aimed to secure the independence from foreign producers. In 2018-2019, the prototype of such technology based on the T339L31 system was developed and tested.

Keywords: numerical weather prediction, ensemble weather prediction, spectral atmospheric model, verification of weather forecasts, mesoscale processes

Введение

В Гидрометцентре России начиная с 1999 года система выпуска глобальных (до 1999 г. – полусферных) численных прогнозов погоды на основе спектральной глобальной модели атмосферы [8, 12] являлась базовой системой глобального численного прогнозирования метеорологических полей на сроки до 10 суток. С 2009 г. параллельно оперативно функционирует полулагранжева глобальная модель атмосферы ПЛАВ Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука (ИВМ РАН) и Гидрометцентра России, активно развиваемая в настоящее время [11].

В период 2009–2019 гг. технологии численного прогнозирования погоды на основе спектральной модели развивались по следующим направлениям: 1) повышение пространственной детализации; 2) развитие системы ансамблевого среднесрочного прогнозирования, требующей многократного увеличения объемов вычислений; 3) создание технологии резервирования боковых и начальных граничных данных для системы регионального прогноза COSMO-Ru, также требующей быстрее

подготовки продукции для возможности совмещения технологических процессов счета задач глобального моделирования и моделирования по ограниченной территории.

1. Повышение пространственной детализации версий спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России

За период 2009–2019 гг. пространственное разрешение оперативных версий спектральной модели после выполнения серий соответствующих оперативных испытаний было повышено от T85L31 (85 сферических гармоник, гауссова сетка примерно $1,4 \times 1,4^\circ$, т. е. 120×145 км в умеренных широтах, 31 вертикальный уровень) до T169L31 (169 сферических гармоник, горизонтальная сетка, соответственно, примерно 60×72 км, оперативное внедрение в 2010 г.) и T339L31 (339 сферических гармоник, с сеткой приблизительно 30×36 км, оперативная эксплуатация с середины 2015 г.). В настоящее время в исследовательском режиме функционируют версии модели T169L63 и T339L63 с 63 вертикальными уровнями. В течение указанного периода времени разработчикам неоднократно приходилось менять вычислительные платформы, в настоящее время T339L31, T169L63 и T339L63 функционируют на ЭВМ Cray XC40-LS. Отметим, что переход на оперативный счет версий модели с более высоким пространственным разрешением, как правило, происходит примерно через 1–1,5 года после ввода в оперативную эксплуатацию новой высокопроизводительной вычислительной техники ММЦ Москва после их детального тестирования и кропотливого процесса подготовки и адаптации к необходимым наборам данных: соответствующим новому разрешению модели атмосферы полям рельефа, «маски» суша – море и т. д., созданием/применением обновленных инфраструктурных элементов (например, баз данных входной и выходной продукции, средствам визуализации и распространения продукции). По результатам тестирования затем производится дополнительная настройка и доработка алгоритмов модели. В ходе разработки и эксплуатации T339L31 была введена коррекция алгоритма вычислений температуры земной поверхности, а также полностью обновлен постпроцессинг результатов вычислений и препроцессинг модели. Были проведены работы по модификации радиационного блока модели. В последние годы большое внимание уделялось процессу перехода на использование результатов новой системы вариационного объективного анализа (ОА 3D-Var) [13] в качестве начальных данных, а также системам представления результатов пользователям в визуализированном виде посредством сети Интернет.

В текущем 2019 году оперативной версией спектральной модели атмосферы является T339L31 (с резервированием вычислений на менее мощной технике с использованием T169L31). Шаг сетки модели T339L31 ($30\text{--}35$ км в умеренных широтах) уже позволяет моделировать барические образования на верхней границе интервалов размеров атмосферных

циркуляций β -мезомасштаба (20–200 км по классификации Олански [18]). По результатам оперативных испытаний Т339L31 в 2014 г. было зафиксировано, 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 мезо-арктические циклоны, представляющие особую важность для прогнозирования экстремальных погодных явлений».

В ходе эксплуатации было отмечено, что модель Т339L31 может прогнозировать зарождение таких циклонов и с существенно большей заблаговременностью, чем Т169L31, «видит» их развитие. Так, на рис. 1 рассматривается случай прогнозирования тропического циклона в Оманском заливе Индийского океана в октябре 2019 г. моделями Т339L31 и Т169L31.

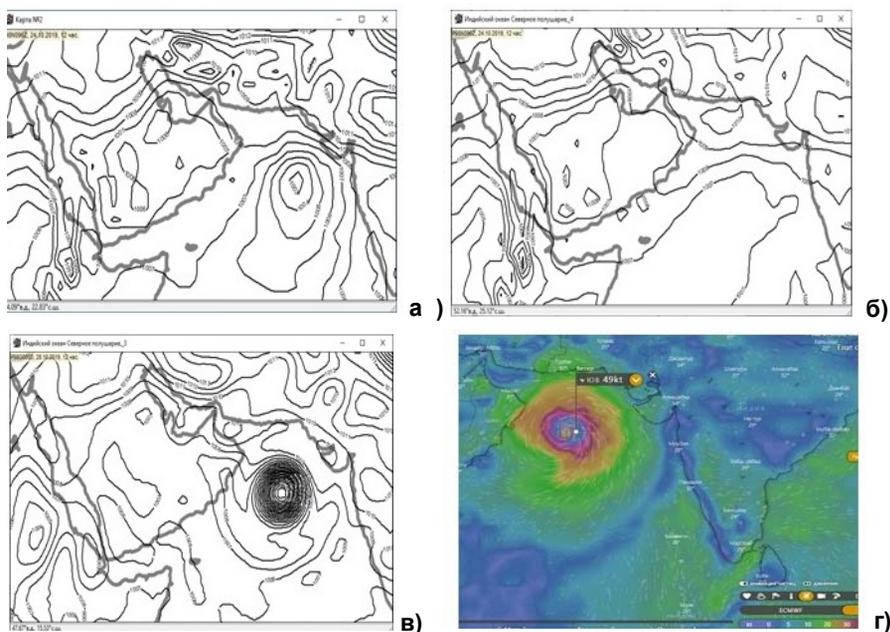


Рис. 1. Пример прогнозов тропического циклона (поля давления на уровне моря) 28.10 2019 г. с заблаговременностью 96 ч по Т339L31 (а) и Т169L31 (б), данные объективного анализа Гидрометцентра России (0.5×0.5°) (в). Цветной рисунок (визуализация <https://www.windy.com>) показывает прогноз NCEP поля ветра на 72 ч на тот же момент времени (г).

Fig. 1. The 96-h forecast of a tropical cyclone (sea level pressure) for 28.10.2019: Т339L31 (а); Т169L31 (б); objective analysis of the Hydrometcenter of Russia (0.5×0.5°) (в). The colored figure (г) shows the NCEP wind 72-h forecast valid at the same moment (visualization via <https://www.windy.com>).

Можно увидеть, что, в отличие от T169L31, модель T339L31 с достаточно большой заблаговременностью (96 ч) спрогнозировала этот циклон. Размеры данного циклона – около 200 км в диаметре – являются пороговыми для пространственного разрешения T339L31, поэтому нельзя ожидать адекватного воспроизведения данной моделью внутренней структуры таких образований (например, истинной глубины циклона). Тем не менее сам факт формирования и местоположение циклона, как видно из рисунка, были предсказаны достаточно точно.

На рис. 2 показано сравнение прогнозов по обеим версиям спектральной модели для случая быстроразвивающегося арктического циклона в Баренцевом море (в начальных полях циклона еще не было, на рисунке показаны прогнозы на 36 ч). Как видно, в модели с мезомасштабным разрешением T339L31, в отличие от более «грубой» T169L31, севернее Скандинавского побережья сформировался циклон (просматривается замкнутая изобара). Соответствующие такой циркуляции направление и скорость ветра в этой части Баренцева моря оказались гораздо ближе к реальности, значимо отличаясь от направления ветра по прогнозу T169L31.

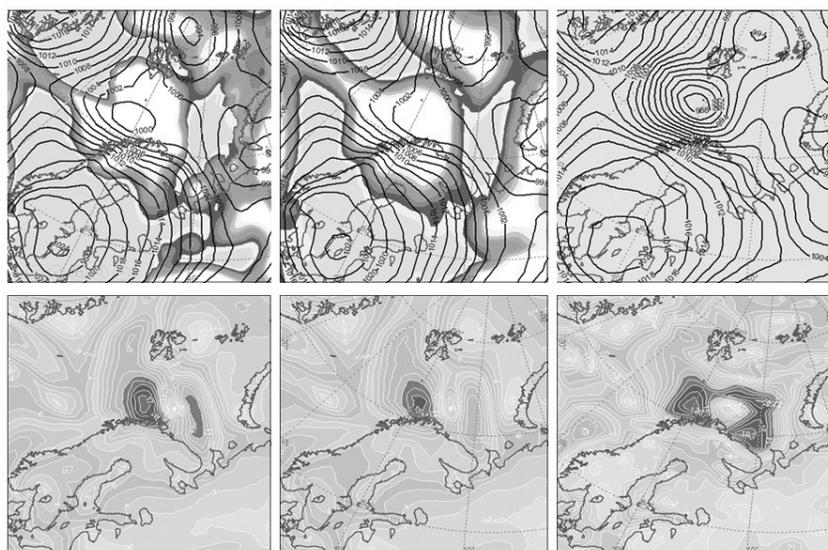


Рис. 2. Пример прогнозов арктических циклонов 04.04.2014 на 36 ч: поля давления на уровне моря и облачности среднего яруса (верхний ряд); среднего ветра (нижний ряд). Прогнозы по T339L31 (слева) и T169L31 (в центре) в сравнении с данными объективного анализа Гидрометцентра России 1.25x1.25° (справа). Области со скоростями среднего ветра более 13 м/с выделены темным фоном.

Fig. 2. The 36-h forecasts of a polar low valid on 04.04.2014. Upper row: sea level pressure and medium level clouds, lower row: average wind. Models forecasts of T339L31 (left); T169L31 (middle); objective analysis of the Hydrometcenter of Russia (1.25x1.25°) (right): Areas with average wind speed above 13 m/s are shown dark.

По сравнению с полями объективного анализа, зоны штормовых фоновых ветров (выделены более темным фоном на рисунках в нижнем ряду) в Баренцевом море и вблизи его побережий предсказаны более реалистично по T339L31: они занимают большую площадь и характеризуются более высокими значениями скоростей ветра, чем по T169L31.

При анализе ежедневных прогнозов в ходе эксплуатации было выявлено, что отмеченные выше различия в прогнозировании небольших по размерам циклонов с помощью моделей T339L31 и T169L31 проявляются практически в каждом случае рассмотренных видов циклогенеза.

Помимо более высокой реалистичности прогнозируемого по T339L31 развития циркуляционных структур небольших размеров, качественный анализ предсказанной структуры метеополей выявил сравнительно высокую подробность отображения в прогнозах T339L31 таких метеорологических величин, как вертикальные скорости, приводный/приземный ветер, осадки и облачность, а также распределения приземной температуры в горных областях. Также были выявлены особенности более реалистичного отображения участков максимального ветра в струйных течениях на уровне 250 гПа.

Поскольку рассмотренные процессы имеют небольшие области распространения и быстрый жизненный цикл, в общей статистике осредненных за месяц и по большим территориям показателей успешности численного прогнозирования способность модели прогнозировать перечисленные явления и характеристики может и не отразиться. Поэтому можно сделать вывод, что в качестве дополнительного аспекта проведения оперативных испытаний новых моделей численного прогноза погоды целесообразно дополнять анализ средних показателей успешности, характеризующих прогнозирование крупномасштабных процессов, анализом отдельных случаев прогнозирования развития процессов, подобных рассмотренным выше.

С точки зрения формальных показателей качества прогнозов, наиболее чувствительными к повышению детализации вычислений должны быть метеорологические поля с высокой пространственной изменчивостью. Таковыми являются поля осадков (особенно в теплый период года), поля приземного давления (для отдельных районов и сезонов), поля ветра верхней тропосферы – нижней стратосферы в областях струйных течений. Ниже показано, как влияет изменение разрешения модели на прогноз этих характеристик.

Рис. 3 и 4 построены по результатам сравнения прогнозов с данными измерений на метеостанциях (в отличие от сравнения в узлах сеток объективного анализа), что удобно с точки зрения как самой верификации прогнозов таких изменчивых полей, как осадки, так и объективности сравнения показателей между различными моделями атмосферы, вне зависимости от объективного анализа, по которому производится сравнение. Также на этих рисунках показаны значения данных показателей

для моделей ПЛАВ и COSMO-Ru7 в первый и последний годы анализа. Рисунки построены по информации, доступной на сайте <http://method.meteorf.ru/>.

На рис. 3 приводятся сведения об успешности прогнозов на 72 ч давления на уровне моря для декабря 2012–2018 гг. (среднеквадратическое отклонение, сравнение с данными наблюдений на метеостанциях Европейской территории России). Декабрь был выбран как месяц с традиционно наиболее низкими оценками прогнозов данной характеристики. Очевиден тренд снижения среднеквадратической ошибки прогнозов данной характеристики по версиям спектральной модели атмосферы (от 5,5 до 3,7 гПа) в рассматриваемый период несмотря на межгодовые колебания, связанные с малым размером области сравнения и с различием синоптических процессов в течение данного месяца от года к году.

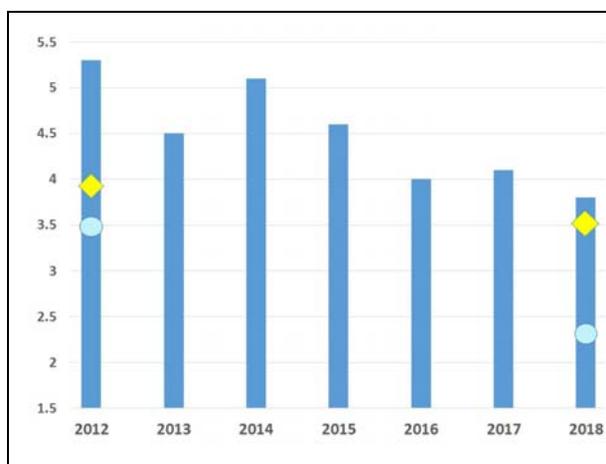


Рис. 3. Среднеквадратические ошибки декабрьских прогнозов давления на уровне моря с заблаговременностью 72 ч для 2012–2018 гг. по метеостанциям ЕТР: по оперативным версиям спектральной модели атмосферы (столбики); в начальный и конечный год сравнения по моделям ПЛАВ (желтые ромбы) и COSMO-Ru7 (голубые овалы).

Fig. 3. The root mean square errors of 72 hour mean sea level pressure forecasts for Decembers 2012-2018 for the operational versions of the atmospheric spectral model (columns). For the first and last years of our comparison, the errors for SLAV and COSMO-Ru7 models are shown by yellow rhombs and blue ovals correspondingly. Verification against the meteorological station observations over the European part of Russia.

На рис. 4 показана эволюция успешности моделирования 12-часовых сумм осадков на третьи сутки прогнозов для июней (как месяцев с наибольшей изменчивостью полей осадков). Представлены критерии общей оправдываемости и Багрова – Хайдке, а также абсолютные ошибки прогноза. Для уменьшения эффекта межгодовой изменчивости вследствие большой зависимости оценок от синоптических процессов выполнено

осреднение ночных-дневных показателей и построены межгодовые скользящие средние. Очевидно повышение успешности прогнозирования по всем приведенным метрикам, характеризующим качество описания моделью как факта выпадения осадков, так и их количества.



Рис. 4. Скользящие средние июньских значений общей оправдываемости, % (сверху слева); критерия Багрова-Хайдке (сверху справа) факта выпадения и абсолютной ошибки, мм, (внизу) прогнозов 12-часовых сумм осадков на третьи сутки (осреднение критериев за периоды 54–66 и 48–54 ч) для 2012–2019 гг. по ETP по оперативным версиям спектральной модели атмосферы; в начальный и конечный год сравнения по моделям ПЛАВ (желтые ромбики) и COSMO-Ru7 (голубые овалы)

Fig. 4. The sliding average of accuracy % (upper left), Heidke skill score of precipitation occurrence (upper right), and absolute error, mm (bottom) of 12-h precipitation forecasts by the operational spectral model for the third days of June simulations in 2012–2019. The criteria are averaged over 54–66 and 48–54 forecast hours. For the first and last years of the comparison, the errors for SLAV and COSMO-Ru7 models are shown by yellow rhombs and blue ovals correspondingly.

В контексте анализа чувствительности прогнозов сумм летних осадков к разрешению модели атмосферы видно, что прогнозы по модели COSMO-Ru7 (шаг сетки 7 км) значительно превосходят по успешности прогнозы обеих глобальных моделей Гидрометцентра России. Отметим, что в случае с COSMO-Ru7 разрешение модели не менялось за рассматриваемый период, а на повышение успешности прогноза существенно повлияло увеличение точности начальных данных и условий на границах, связанное с переходом на использование глобальной модели ICON в качестве «материнской» в 2015 году [9].

Рис. 5 подтверждает повышение успешности прогнозирования ветра свободной атмосферы по спектральной модели. На рисунке приведен межгодовой ход среднеквадратических ошибок 24-часового прогноза вектора скорости ветра для Северного полушария на уровне 250 гПа (где наблюдаются высокие градиенты скорости ветра). Оценки рассчитаны относительно результатов объективного анализа Гидрометцентра России. Ошибка падает от 6,7 м/с в 2012 г. до 5,8 м/с в 2018 г. Отметим, что уровень требований ИКАО к точности прогноза данной характеристики составляет 6 м/с.

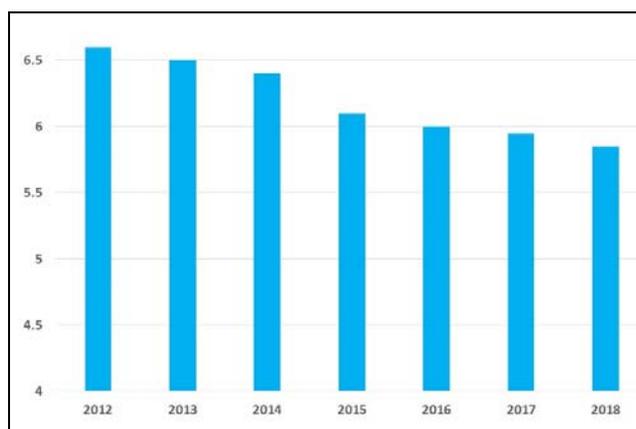


Рис. 5. Среднегодовые среднеквадратические ошибки 24-часового прогноза вектора скорости ветра для 2012–2018 гг. для Северного полушария. Оценки относительно объективного анализа Гидрометцентра России.

Fig. 5. The annual mean RMSE of vector wind speed 24-h forecasts over the Northern hemisphere in 2012-2018. Verification against the Hydrometcenter of Russia objective analysis.

2. Развитие системы ансамблевого среднесрочного прогнозирования

Прогнозирование состояния атмосферы с использованием ансамблевого подхода является методом численного моделирования, активно развиваемым во всем мире. С помощью ансамблевых прогнозов можно не только более надежно (по сравнению с отдельными детерминированными прогнозами) описать будущую эволюцию во времени большинства метеорологических переменных, но и обеспечить пользователя априорной информацией о достоверности предоставляемых ему прогностических данных. Оперативный выпуск ансамблевых прогнозов является одним из требований, предъявляемых к мировым метеорологическим центрам.

В 2010–2015 гг. в Гидрометцентре России была создана и апробирована Система глобальных кратко- и среднесрочных Ансамблевых Прогнозов (САП) [2, 3, 5], основанная на применении совокупности (ансамбля)

прогнозов, стартующих со слегка различающихся начальных данных о состоянии атмосферы. Для создания необходимого ансамбля начальных данных был использован бридинг-метод [17], с помощью которого в результаты объективного анализа вносятся возмущения, по величине сопоставимые с его ошибками.

По итогам оперативных испытаний САП была рекомендована к применению и с середины 2015 г. функционирует в оперативном режиме, ежедневно выпуская продукцию в цифровом и графическом видах.

В последующие годы было продолжено развитие системы, в частности, расширен набор продукции САП, усовершенствованы способы предоставления информации, улучшено ее качество.

В настоящее время размер ансамбля Системы – 14 реализаций. Основной моделью в САП является спектральная модель атмосферы Гидрометцентра России с разрешением 169 гармоник и 31 уровень по вертикали (T169L31) [8, 12]. В САП используется контрольный прогноз и 12 возмущенных прогнозов по T169L31. Пре- и постпроцессинг модели оперативной технологии среднесрочного прогноза [10] модифицированы для применения в системе ансамблевых прогнозов. Дополнительно в ансамбль включен контрольный прогноз по полулагранжевой модели ПЛАВ2008 ИВМ РАН и Гидрометцентра России [11]. Разрешение вычислительных сеток использованных моделей сопоставимо. В настоящее время в ансамблевой системе среднесрочного прогноза Гидрометцентра России все реализации включены с одинаковыми весами.

Прогнозы рассчитываются в режиме реального времени для заблаговременностей до 10 сут по сроку 12 ч ВСВ по всему глобусу. Результаты всех прогнозов архивируются на сетке с $1,25 \times 1,25^\circ$ с шагом 6 ч по заблаговременности в общедоступных базах данных Гидрометцентра России. Цикл хранения прогнозов – 40 суток.

Для агрегации и удобного представления результатов прогнозирования разработана система ансамблевого постпроцессинга, выполняющая расчеты различных статистических характеристик (среднее по ансамблю, разброс прогнозов в ансамбле, вероятности определенных событий и т. д.). Подготовленные характеристики также архивируются в общедоступных базах данных Гидрометцентра России.

Для работы пользователей с продукцией ансамблевых прогнозов создана специальная автоматизированная технология отображения результатов ансамблевого моделирования в виде ансамблевых метеограмм и веерных диаграмм, а также карт «спагетти» для таких элементов, как осадки, облачность, температура и т. п. Ансамблевые метеограммы для столиц всех субъектов Российской Федерации регулярно размещаются на сайте Гидрометцентра России (<http://www.meteoinfo.ru/glb-ens-ffc>). Метеограммы для ряда пунктов стран Центральной Азии (список пунктов сформирован в соответствии с запросами метеослужб-участниц проекта ВМО SWFDP-CA) размещаются на сайте проекта (<http://swfdp-ca.meteoinfo.ru>). Также на сайте проекта ВМО SWFDP-CA представлены

карты «спагетти» для всей России и окружающих регионов. Дополнительно для контроля функционирования системы и выполнения исследовательских задач ежедневно рисуются карты всех прогнозов ансамбля на одной странице – так называемые «почтовые марки». В исследовательском режиме рекомендуется визуализировать продукцию САП посредством графического пакета «Изограф» [1]. Примеры графической продукции САП представлены на рис. 6 и 7. На ансамблевых метеограммах дополнительно показаны результаты детерминированных прогнозов по моделям более высокого пространственного разрешения – T339L31 и ПЛАВ20 (с шагами вычислительных сеток около 30–35 и 20 км соответственно), что позволяет пользователям получить комплексную прогностическую информацию.

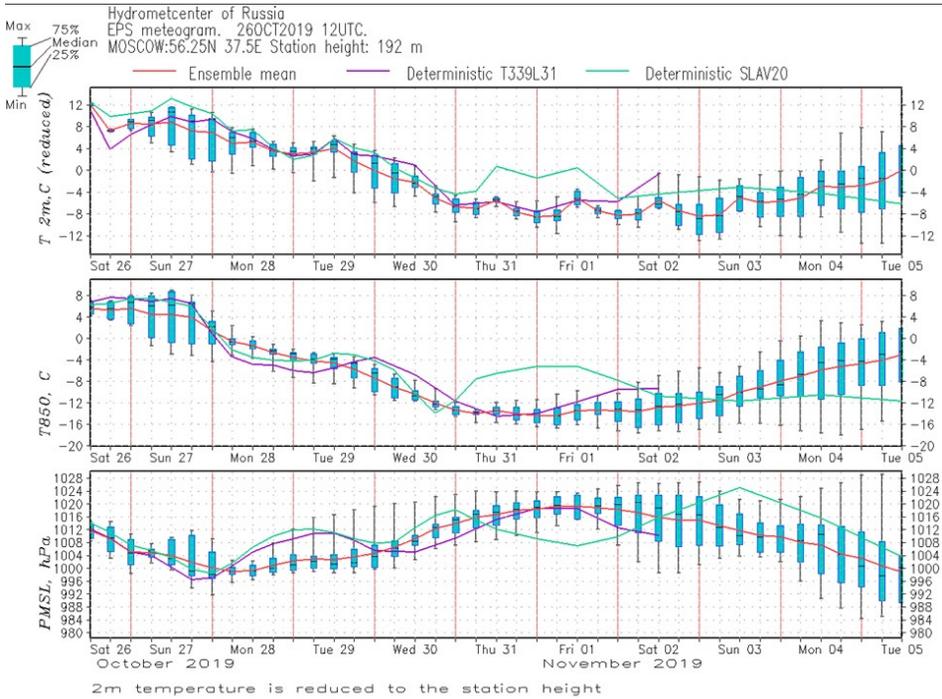


Рис. 6. Пример ансамблевой метеограммы для Москвы на период 26 октября – 4 ноября 2019 г.

Fig. 6. An ensemble meteorogram for Moscow for the period October 26 – November 4, 2019.

С 2019 года, в соответствии с требованиям нового Наставления ВМО [16], ключевая продукция системы ансамблевых прогнозов, а именно поля вероятностей определенных событий (например, вероятности выпадения осадков более 1, 5, 10, 25, 50 мм в сутки, вероятности аномалий температуры, превышающих стандартное отклонение от климата и т. д.), поля

средних по ансамблю и разброса в ансамбле (среднее квадратическое отклонение прогнозов от среднего по ансамблю) для ряда метеорологических элементов на сетке $1,5 \times 1,5^\circ$, представляется в коде GRIB2 и поступает в Авиаметтелеком Росгидромета для дальнейшего распространения в рамках международного обмена ВМО по каналам Глобальной системы телесвязи (ГСТ).

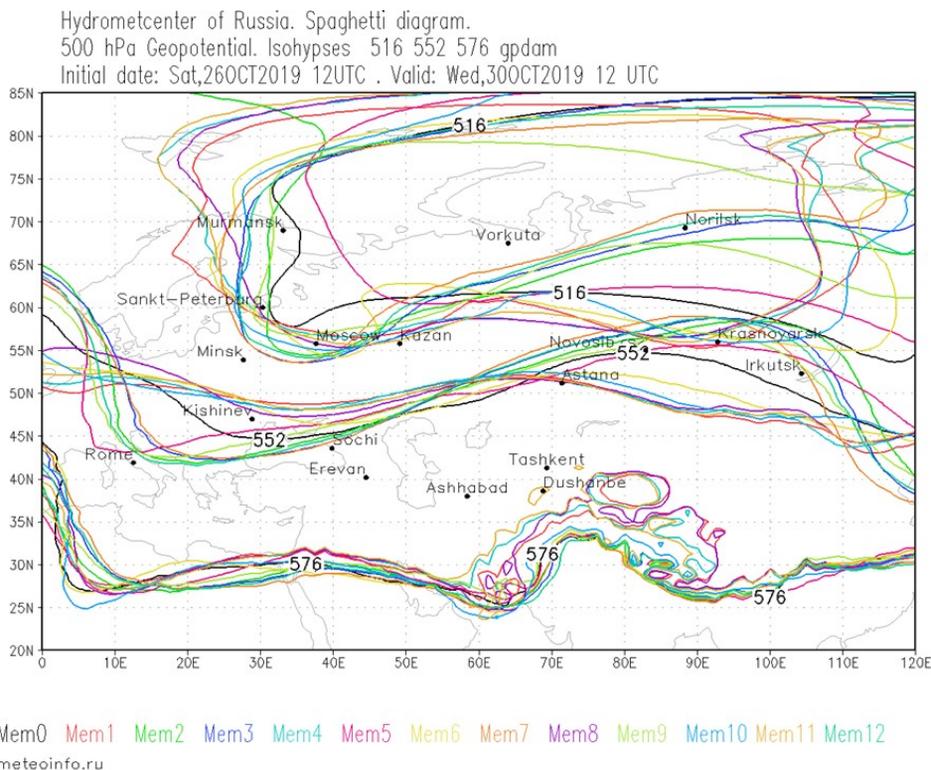


Рис. 7. Пример карты «спагетти» для прогноза высоты геопотенциальной поверхности 500 гПа по начальным данным от 26 октября 2019 г. с заблаговременностью 96 ч.

Fig. 7. Spaghetti diagram for 500 hPa geopotential height forecasts. Initial date – October 26, 2019. Lead time – 96 h.

Для оценки качества ансамблевых прогнозов была разработана и внедрена специальная система верификации [6], которая позволяет рассчитывать оценки вероятностных прогнозов в соответствии с требованиями Ведущего центра ВМО по верификации ансамблевых прогнозов [15]. Агрегированные за месяц вероятностные оценки регулярно передаются на сайт Ведущего центра по верификации ансамблевых прогнозов, где они представляются в графической форме наряду с оценками других мировых центров.

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

- прогнозы по спектральной модели по сроку 12 ч ВСВ на 240 часов (основная задача);
- ансамблевый постпроцессинг: расчет полей средних и разброса по ансамблю, прогностических вероятностей, архивация результатов;
- прогнозы по спектральной модели по сроку 00 ВСВ на 12 часов (необходима для модификации возмущений начальных данных, которая должна осуществляться каждые 12 часов);
- копирование информации о результатах прогноза по модели ПЛАВ2008 в ансамблевую базу данных;
- проверка кодов завершения задачи прогноза за срок 12 и 00 ч ВСВ;
- подготовка маски «наблюдалось/не наблюдалось явление» по результатам объективного анализа для расчета вероятностных оценок качества прогнозов 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;
- подготовка информации для распространения по каналам ГСТ.

Все перечисленные выше задачи запускаются в определенное время суток с помощью программы-демона cron. Кодирование информации для распространения по каналам ГСТ выполняется в дополнительных задачах, подготовленных и сопровождаемых сотрудниками отдела АСОИИ Гидрометцентра России.

Расчеты всех прогнозов ансамбля выполняются с использованием параллельных вычислений для каждого из прогнозов. Кроме того,

при функционировании САП 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.

С 2015 года система трижды переносилась с одного компьютера ММЦ Москва на другой. Оптимальной организацией вычислений по ансамблевой системе является одновременный запуск всех прогнозов ансамбля. Однако в реальности, в зависимости от доступных вычислительных ресурсов, организация вычислений САП была различной на разных ЭВМ. Так, в начале 2018 года был осуществлен перенос САП на технику, поступившую на первом этапе реализации проекта по модернизации ММЦ Москва (ЭВМ Fujitsu). Из-за ограниченности выделенных ресурсов (для САП был выделен 1 узел с 36 процессорными элементами (ПЭ)), пришлось модифицировать управляющие сценарии (скрипты командного интерпретатора `bash`) САП и, используя 16 ПЭ для вычислений по модели атмосферы и 1 ПЭ для ее постпроцессинга, организовать оперативные расчеты для контрольного прогноза и последовательно для 6 пар возмущенных прогнозов. Начиная с весны 2019 велись работы по переносу САП на ЭВМ CRAY XC40-LC, где имеется возможность выполнять все прогнозы одновременно и использовать для каждого прогноза по 32 процессора. Это позволило существенно сократить время (до 11,5 мин астрономического времени), необходимое для подготовки прогноза.

С февраля 2018 года в качестве начальных данных используется вариационный анализ 3D-Var Гидрометцентра России, что повысило эффективность САП. На рис. 8 представлены диаграммы надежности для ансамблевых прогнозов H500 (размещаемых на сайте Ведущего центра ВМО по верификации ансамблевых прогнозов), демонстрирующие влияние перехода на новые начальные данные.

3. Создание технологии резервирования поступления необходимых начальных и граничных данных для системы регионального прогноза COSMO-Ru

В настоящее время в большинстве метеослужб ВМО реализованы системы вычислений краткосрочных численных прогнозов погоды высокой детализации (до нескольких километров по горизонтали) по ограниченным территориям, охватывающим соответствующие зоны ответственности. «Рабочими» для большинства стран Европы становятся шаги вычислительных сеток 2–3 км, поскольку интерес пользователей к результатам прямого моделирования явлений погоды все возрастает, а успех его напрямую связан с детализацией вычислений. При этом используются негидростатические модели атмосферы, как правило, принципиально более высокого уровня точности и подробности физических описаний в сравнении с глобальными моделями. Высокая детализация моделей

по ограниченным территориям позволяет повысить надежность численных прогнозов областей сильных осадков, штормовых ветров, погоды в районах сложных географических условий (в горах и на побережьях).

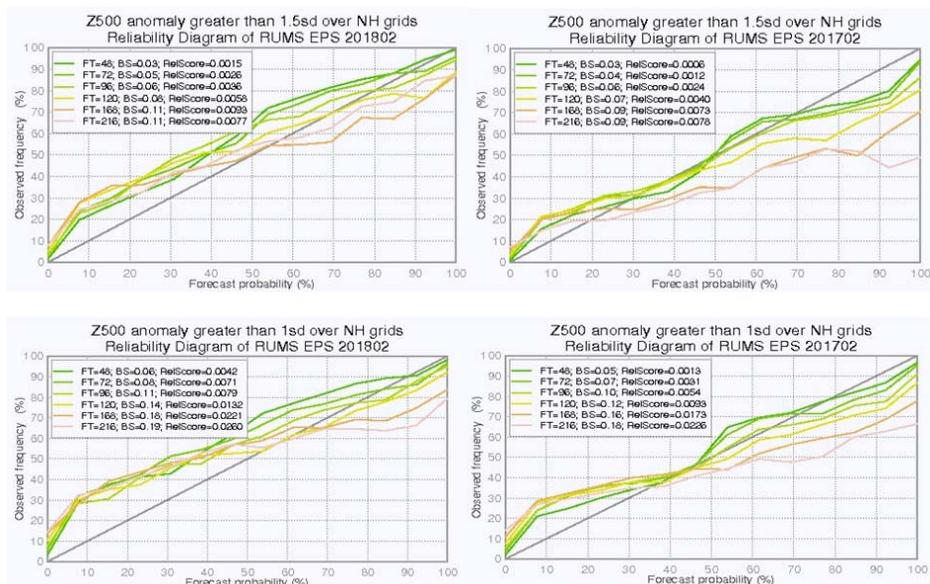


Рис. 8. Уменьшение прогнозируемой частоты явлений «Аномалия H500 > 1,5 std» (верхний ряд) и «Аномалия H500 > 1 std» (нижний ряд) для заблаговременностей прогноза от 48 до 216 ч по вычислениям САП по исходным данным новой системы объективного анализа Гидрометцентра России 3D-Var (слева) в сравнении со старой системой ОА (справа).

Fig. 8. A decrease in the frequency of the events “H500 anomaly > 1,5 std” (upper row) and “H500 anomaly > 1 std” (lower row) in EPS forecasts with lead times from 48 to 216 h starting from the new 3D-Var objective analysis of the Hydrometcenter of Russia (left column) and from the old OA system (right column).

Следует отметить, что детализация вычислений и успешность ведущих глобальных моделей мира также постоянно растут и достаточно высоки в настоящее время, однако в большинстве прогностических центров нет возможности использовать высокодетальную продукцию глобальных моделей в полной мере в силу вынужденного существенного «огрубления» информации по пространству и номенклатуре для ее надежной передачи по каналам связи, особенно в рамках стандартов ГСТ ВМО. Таким образом, в настоящее время наиболее распространенным является распределенный с точки зрения выполнения вычислений «каскадный» подход получения продукции высокой детализации – от глобального масштаба в мировых центрах до регионального/локального масштабов в региональных/национальных центрах ВМО, которые применяют другие модели для выполнения детализированных вычислений по своим

территориям. Следует отметить, что в настоящее время одновременно приобретает популярность так называемый «бесшовный» подход. Рассмотрим пример его реализации в оперативном режиме в системе глобального моделирования Немецкой службы погоды на основе модели ICON [19]. В данной системе «телескопизация» вычислений на сетках различных шагов с обратными связями может производиться в рамках одного и того же вычислительного модуля модели атмосферы. Система может выполнять вычисления по всему глобусу с вложенными областями более высокого разрешения в нескольких заданных районах земного шара без последовательной каскадной детализации. Однако работа с национальными метеорологическими центрами, использующими продукцию ICON в качестве источника начальных данных и данных на боковых границах, по-прежнему производится по последовательному «каскадному» принципу.

В Гидрометцентре России с 2009 года функционирует оперативная система численного краткосрочного прогноза погоды по ограниченной территории COSMO-Ru, на основе неоднократных испытаний показывавшая преимущество по качеству прогнозирования элементов приземной погоды по сравнению со всеми другими имеющимися в распоряжении синоптиков России продуктами численного прогноза погоды. Система работает с различной детализацией по различным частям России с шагами вычислительных сеток от 13,2 до 1 км [9]. Начальные данные и данные на границах области вычислений система COSMO-Ru получает из системы моделирования ICON Немецкой службы погоды. По результатам оперативных испытаний, по всей территории России с 2018 г. прогнозы элементов погоды по всем эксплуатируемым версиям модели COSMO-Ru признаны основным расчетным методом для использования в прогностических центрах нашей страны совместно «с уточняющими региональными (локальными) методами прогнозирования».

Для повышения надежности процесса обеспечения системы начальными/граничными условиями, в 2018–2019 гг. на основе технологического процесса счета T339L31 в Гидрометцентре России был построен прототип Интегрированной системы глобальных-региональных вычислений, позволяющей получать необходимые данные для системы COSMO-Ru (включая начальные поля) из технологической цепочки численного прогноза по модели T339L31, полей объективного анализа Гидрометцентра России и задаваемых вне оперативных вычислений характеристик подстилающей поверхности по модели ICON. В качестве начальных данных используется объективный анализ Гидрометцентра России (3D-Var) [13], данные которого преобразовываются программным комплексом T339L31 в формат, удовлетворяющие программному обеспечению COSMO-Ru.

Сложность заключалась в создании системы, функционирующей в режиме, приближенном к квази-оперативному, при котором первая часть информации – результаты расчетов по T339L31 (поля анализов и прогнозов) на первые 12 часов – должна быть готова не позже, чем через 3,5 ч

после срока наблюдений. Последующие расчеты должны производиться на фоне вычислений COSMO-Ru, не задерживая их и формируя боковые условия с шагом по заблаговременностям 3 ч. Для этих целей была использована версия T339L31 на ЭВМ Fujitsu, которая при распараллеливании на 32 процессорах расходует не более 15 мин астрономического времени для прогноза на сутки на фоне работы других задач. Используемую в прототипе данной системы версию COSMO-Ru далее по тексту будем называть COSMO-RuS. По домену вычислений данная версия совпадает с областью COSMO-Ru13 ENA [9] и имеет шаг сетки 13,2 км. Продукция должна быть доступна синоптикам не позже, чем через 5 ч после срока наблюдений, т. е. в 8 ч утра по московскому времени для срока наблюдений 00 ч ВСВ.

Цель создания такой системы – минимизировать зависимость моделирования в рамках COSMO-Ru от возможных сбоев в поступлении зарубежной информации о начальных и боковых условиях для работы модели по ограниченной территории. Для выполнения данной работы было необходимо адаптировать программное обеспечение постпроцессинга T339L31 и препроцессинга COSMO-RuS для обеспечения совместимости форматов данных, а также произвести ряд манипуляций с поступающей оперативно продукцией объективного анализа Гидрометцентра России и модели Немецкой службы погоды ICON. Помимо этого, потребовалось создать полностью независимую от поступления информации ICON систему усвоения данных о характеристиках снежного покрова на основе модели SnoWE [7, 14] – данных, необходимых для старта модели COSMO-Ru и не содержащихся в базах данных Гидрометцентра России.

Общая схема разработанной технологии показана на рис. 9.

Отметим, что одной из принципиальных сложностей построения данной системы является формирование параметров состояния суши. Дело в том, что в силу различий схем параметризаций поверхности суши T339L31 и модели COSMO требуется поступление информации о начальных значениях температуры и влажности всех почвенных слоев, водном эквиваленте снежного покрова, а также внешних параметров подстилающей поверхности суши из дополнительных источников. Данные из глобальных архивов – могут быть «загружены» в систему на основе климатической версии COSMO, однако для вычисляемых характеристик (температура и влажность всех почвенных слоев, водный эквивалент снега) требуется выполнение циклических вычислений с использованием в качестве исходных данных спрогнозированных моделью COSMO-Ru значений за предыдущий срок/сутки. Однако такой подход для вычислений значений водного эквивалента, без «привязки» к данным измерений, приводит к существенным ошибкам из-за накопления ошибок вычислений. Поэтому в рамках реализации «самозамкнутой» Интегрированной технологии была реализована система усвоения информации о снежном покрове на основе применения одномерной модели снега SnoWE [7,14],

которая преобразует значения высоты снега, ежедневно наблюдаемой в рамках стандартных синоптических измерений, в водный эквивалент. После этого система усвоения данных о снежном покрове производит совмещение вычисленных значений с результатами 24-часового прогноза COSMO-RuS. В рамках циклического функционирования данной системы формируются также поля температуры и влажности почвенных слоев.

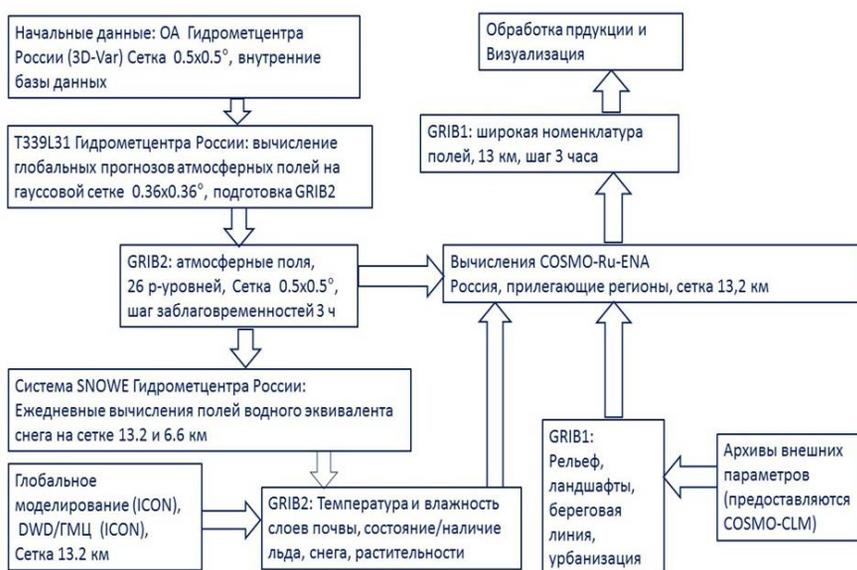


Рис. 9. Схема прототипа Интегрированной системы краткосрочного регионального детализированного прогноза COSMO-RuS с использованием начальных и боковых атмосферных условий по технологии моделирования T339L31.

Fig. 9. A schematized prototype of the Integrated system COSMO-RuS for short-range regional detailed forecasting using initial and boundary atmospheric conditions from the T339L31 technology.

Интегрированная система функционирует в тестовом режиме в Гидрометцентре России с 2018 года. Анализ стандартных показателей успешности численного прогноза погоды показал, что применение данного комплекса вычислений COSMO-RuS привело к некоторому снижению успешности прогнозов по отношению к успешности COSMO-Ru13 ENA. При этом успешность прогнозов по COSMO-RuS оказалась выше, чем успешность прогнозов T339L31. Особенно ярко это проявилось для полей с большими горизонтальными градиентами значений метеопараметров, например, в прогнозах полей ветра на высоте 250 гПа и температуры на уровне 850 гПа (при осреднении оценок по всей России в сравнении с объективным анализом Гидрометцентра России на сетке $0,5 \times 0,5^\circ$), что показано на рис. 10.

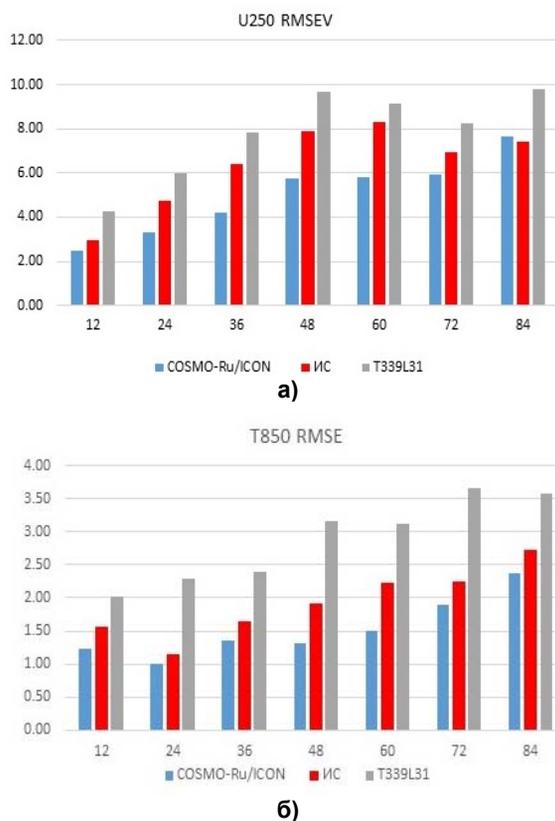
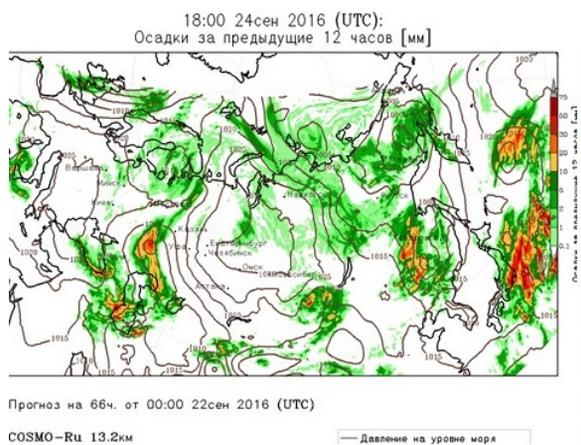


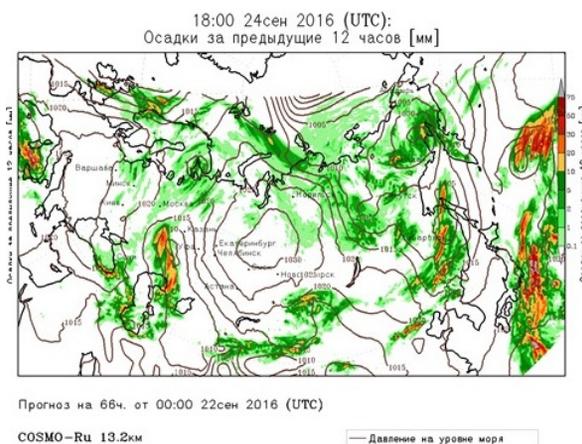
Рис. 10. Среднеквадратические ошибки прогнозов по территории России для сентября 2018 г. по T339L31 (старт от полей ОА Гидрометцентра России), по Интегрированной системе COSMO-RuS (старт от полей ОА Гидрометцентра России с использованием боковых условий T339L31) и по COSMO-Ru13 ENA (старт от начальных/граничных условий по данным Немецкой службы погоды): для вектора скорости ветра на уровне 250 гПа, м/с (а); для температуры воздуха на уровне 850 гПа, град (б).

Fig. 10. Root mean square errors of T339L31 (starting from the objective analysis of the Hydrometcenter of Russia), Integrated system (IS) COSMO-RuS (starting from the objective analysis of the Hydrometcenter of Russia and using the boundary conditions from T339L31), and COSMO-Ru13 ENA (starting from DWD initial/boundary conditions). September 2018, Russian territory: 250 hPa vector wind speed, m/s (a); 850 hPa temperature, deg (б).

На рис. 11 показан пример прогноза на 66 ч 12-часовых сумм осадков и полей давления по Интегрированной системе (COSMO-RuS) и COSMO-Ru13 ENA. Видно, что для территории России прогнозы этих характеристик (конфигурация полей и значения) оказались близки даже для сравнительно больших заблаговременностей прогнозов. Исключением являются области вблизи границ (осадки над западом Средиземного моря и восточнее побережий Камчатки).



а)



б)

Рис. 11. Прогнозы 12-часовых сумм осадков и давления на уровне моря по разным начальным и боковым данным: ICON (DWD) (а) и системы глобального моделирования Гидрометцентра России (б). Заблаговременность прогнозов 66 ч.

Fig. 11. 66-h forecasts of 12-hour accumulated precipitation and sea-level pressure for different initial and boundary conditions: ICON (DWD) (а) and global modeling system of Hydrometcenter of Russia (б).

Таким образом, предложенная Интегрированная система показала свою работоспособность. Подтверждена возможность оперативного выпуска прогнозов сравнительно высокого уровня точности с помощью данной системы, а также способность версии спектральной модели Гидрометцентра России Т339L31 формировать необходимую информацию для старта системы детализированного негидростатического моделирования COSMO-Ru на основе данных, производимых в Гидрометцентре

России, в качестве резервирования, в случае сбоев поступления информации из-за рубежа. Параллельный счет Т339L31, вырабатывающей данные, адаптированные для счета модели по ограниченной территории, показал устойчивость во времени и возможность работы на фоне счета намного более ресурсоемкой COSMO-Ru. Разработанную систему можно рассматривать как прототип аналогичной системы счета с более высокой пространственной детализацией (например, 6,6 км, что соответствует реализованной на CRAY XC40-LC обновленной версии COSMO-Ru6 ENA) и «гибкой» настройкой для выполнения еще более детальных вычислений по отдельным областям России.

Заключение

С точки зрения компьютерной оснащенности период 2009–2019 гг. можно охарактеризовать, с одной стороны, процессом активного наращивания вычислительных мощностей ММЦ Москва, с другой – наличием субпериодов с острым дефицитом вычислительных ресурсов в ожидании технической реорганизации и с введением в оперативную эксплуатацию компьютеров с невысокой производительностью. Программное обеспечение спектральной модели атмосферы распараллелено с помощью технологии MPI, что позволяет быстро выполнять прогноз на многопроцессорной системе [4]. Важной отличительной чертой версий спектральной модели атмосферы оказалась их вычислительная экономичность при весьма высоком уровне показателей успешности (см. <http://method.meteorf.ru>, раздел «Оценки прогнозов»). Именно этот факт определял политику развития технологий на основе спектральной модели атмосферы, заключающуюся в нацеленности на оперативную эксплуатацию с формированием продукции к строго заданным срокам с гарантированным обеспечением текущими вычислительными ресурсами ММЦ Москва.

Авторы выражают благодарность за методическую и технологическую помощь в работе Г.С. Ривину, Д.В. Блинову, сотрудникам отдела АСОИ Гидрометцентра России, а также сотрудникам ГВЦ Росгидромета и его директору С.В. Лубову.

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. Астахова Е.Д., Бундель А.Ю., Багров А.Н., Розинкина И.А., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В., Цветков В.И. Система ансамблевого глобального прогноза метеорологических полей с заблаговременностью до 240 часов: результаты оперативных испытаний. // Результаты испытания новых

и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. Информационный сборник № 43. С. 63-79. <http://method.meteor.ru/publ/sb/sb43/astah.pdf>.

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. Казакова, Е.В., Чумаков М.М., Розинкина И.А. Система автоматизированных расчетов влагозапасов снега на основе численного моделирования и усвоения данных стандартных метеорологических измерений // *Труды ГГО*. 2014. Вып. 571. С. 114-133.

8. 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. 294, № 2. С.321-324.

9. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полохов А.А., Ревокатова А.П., Татаринович Е.В., Чурюлин Е.В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. Вып. 4 (374). С. 37-53.

10. 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. 160-193.

11. Толстых М. А., Шаикин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А. В., Мизяк В.Г., Розутов В.С., Богословский Н. Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А. Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Триада лтд, 2017. 166 с.

12. 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.

13. 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 // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2012. Информационный сборник № 39. С. 7-14. <http://method.meteor.ru/publ/sb/sb39/tsyru.pdf>

14. Чурюлин, Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018. Вып. 368. С. 120-143.

15. Guideline on the exchange and use of EPS verification results. 2019. <http://epsv.kishou.go.jp/EPSv/guideline.pdf>

16. Manual on the Global Data-processing and Forecasting System: Annex IV to the WMO Technical Regulations // WMO-No. 485. 2017. 160 p.

17. Toth Z., Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. // *Mon. Wea. Rev.* 1997. Vol. 125. P. 3297-3319.

18. Trapp R.J. Mesoscale-convective processes in the atmosphere. Cambridge University Press, 2013. 346 p.

19. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2015. Vol. 141, no. 687. P. 563-579.

References

1. Alferov Yu.V. Avtomatizirovannaya graficheskaya sistema dlya vizualizatsii rezul'tatov chislennykh prognozov. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2003, vol. 338, pp. 119-124 [in Russ.].

2. Astakhova E.D. Postroenie ansamblei nachal'nykh polei dlya sistemy kratko- i srednesrochnogo ansamblevogo prognozirovaniya pogody. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2008, vol. 342, pp. 98-117 [in Russ.].

3. Astakhova E.D. Ensemble medium-range weather prediction: the technology implementation on a modern computer base. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 346, pp. 38-52 [in Russ.].

4. Astakhova E.D., Alferov Yu.V. Application of parallel algorithms to the spectral medium-range weather prediction model of the Hydrometcenter of Russia. *Vychislitel'nye Metody i Programirovanie [Numerical Methods and Programming]*, 2007, vol. 8, pp. 138-146 [in Russ.].

5. Astakhova E.D., Bundel' A.Yu., Bagrov A.N., Rozinkina I.A., Ponomareva T.Ya., Ruzanova I.V., Tsvetkov V.I. Sistema ansamblevogo global'nogo prognoza meteorologicheskikh polei s zablagovremennost'yu do 240 chasov: rezul'taty operativnykh ispytaniy. // *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh*

tehnologii, modeli i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyi sbornik, 2016, vol. 43, pp. 63-79. Available at: <http://method.meteor.ru/publ/sb/sb43/astah.pdf> [in Russ.].

6. *Bundel' A.Yu., Astahova E.D., Rozinkina I.A., Semenov A. E., Alferov Yu.V.* Verification of short- and medium-range precipitation forecasts from the ensemble modeling system of the hydrometcenter of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 10, pp. 653-662. DOI: 10.3103/S1068373911100025.

7. *Kazakova E.V., Chumakov M.M., Rozinkina I.A.* A System of Automated Calculations of Snow Water Equivalent Based on the Numerical Modeling and Standard Meteorological Measurements Data Assimilation. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2014, vol. 571, pp. 114-133 [in Russ.].

8. *Kurbatkin G.P., Astahova E.D., Krupchatnikov V.N., Ryabinin V.E., Sal'nik V.A., Smirnov V.D., Frolov A.V.* Model' srednesrochnogo prognoza pogody. *Doklady AN SSSR*, 1987, vol. 294, no. 2, pp. 321-324 [in Russ.].

9. *Rivin G.S., Rozinkina I.A., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Yu., Kirsanov A.A., Shatunova M.V., Chubarova N.Ye., Alferov D.Yu., Varentsov M.I., Zakharchenko D.I., Kopeykin V.V., Nikitin M.A., Poliukhov A.A., Revokatova A.P., Tatarinovich E.V., Churiulin E.V.* COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, no. 4 (374), pp. 37-53 [in Russ.].

10. *Rozinkina I.A., Alferov Yu.V., Astahova E.D., Ponomareva T.Ya., Tsvetkov V.I.* Global'naya operativnaya spektral'naya model' Gidromettsentra Rossii: osnovnye harakteristiki i osobennosti ispol'zovaniya v tekhnologiyah kratko- i srednesrochnogo prognoza. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 160-193 [in Russ.].

11. *Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.Yu., Shlyayeva A.V., Mzyak V.G., Rogutov V.S., Bogoslovskiy N.N., Goyman G.S., Mahnorylova S.V., Yurova A. Yu.* Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza. Triada LTD publ., 2017, 166 p. [in Russ.].

12. *Frolov A.V., Astakhova E.D., Rozinkina I.A., Tsvetkov V.I., Ponomareva T.Ya., Ruzanova I.V.* Actual Predictability of Meteorological Elements from a Global Spectral Model of the Hydrometeorological Research Center of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, vol. 29, no. 5, pp. 1-12.

13. *Tsyruul'nikov M.D., Svireenko P.I., Gorin V.E., Gorbunov M.E., Ordin A.L., Bagrov A.N.* Novaya tekhnologiya ob"ektivnogo analiza na osnove skhemy 3D-VAR // Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyi sbornik, 2012, vol. 39, pp. 7-14. Available at: <http://method.meteor.ru/publ/sb/sb39/tsyruul.pdf> [in Russ.].

14. *Churiulin E.V., Kopeykin V.V., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churiulina A.G.* Analysis of snow cover characteristics by satellite and model data for different catchment areas are located on the territory of the Russian Federation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 368, pp. 120-143 [in Russ.].

15. Guideline on the exchange and use of EPS verification results. 2019. Available at: <http://epsv.kishou.go.jp/EPSv/guideline.pdf>

16. WMO Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I (Annex IV to WMO Technical Regulations). *WMO-No. 485*, Updated in 2017, 160 p.

17. *Toth Z., Kalnay E.* Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, vol. 125, pp. 3297-3319.

18. *Trapp R.J.* Mesoscale-convective processes in the atmosphere. Cambridge University Press, 2013, 346 p.

19. *Zängl G., Reinert D., Ripodas P., Baldauf M.* The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2015, vol. 141, no. 687, pp. 563-579.

Поступила в редакцию 12.11.2019 г.

Received by the editor 12.11.2019.