

*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 REPS 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 BMO SWFDP-CA (<http://swfdp-ca.meteoinfo.ru>). Карты «спагетти» представлены на сайте проекта BMO 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 BMO 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 BCB 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].

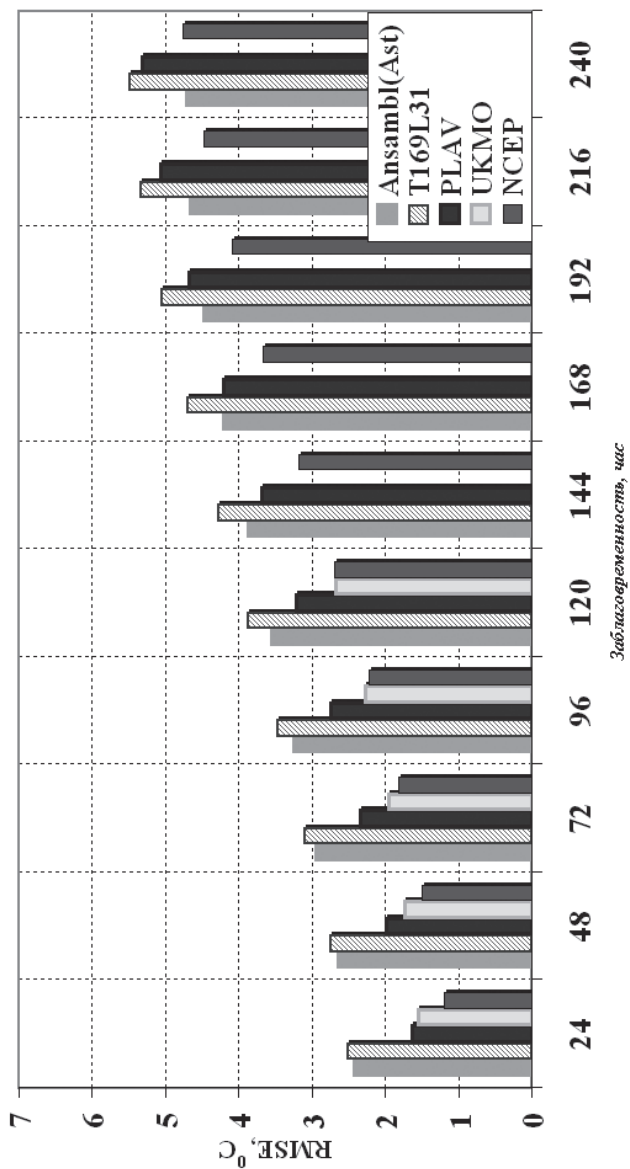


Рис. 1. Среднеквадратическая ошибка прогноза температуры на уровне 850 гПа для региона Европа.

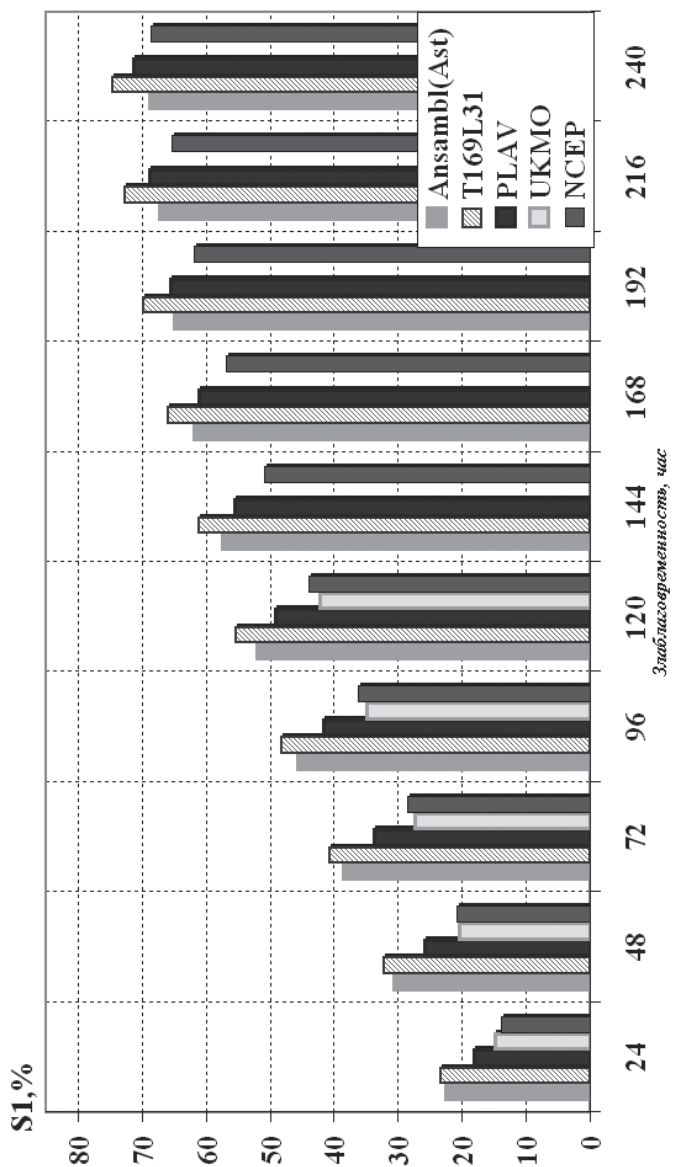


Рис. 2. Градиентная ошибка прогноза геопотенциала на уровне 500 гПа для региона Северное полушарие.

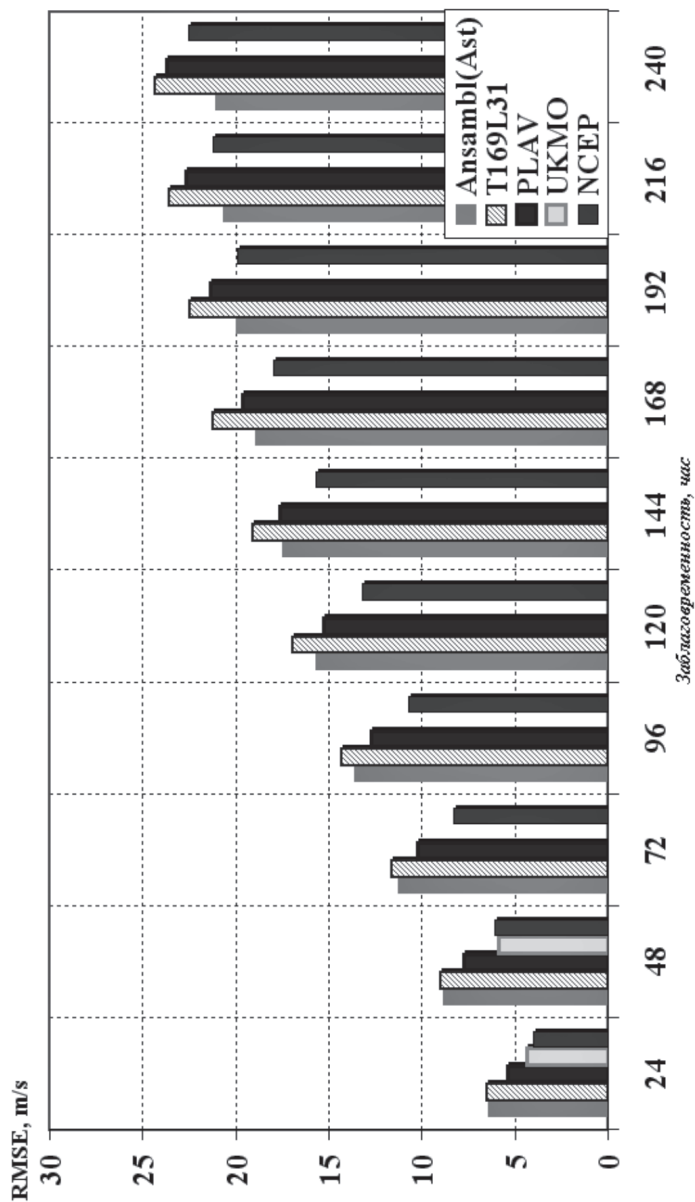


Рис. 3. Среднеквадратическая векторная ошибка прогноза меридиональной скорости ветра на уровне 250 гПа для региона Северное полушарие.

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 ВCB 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.

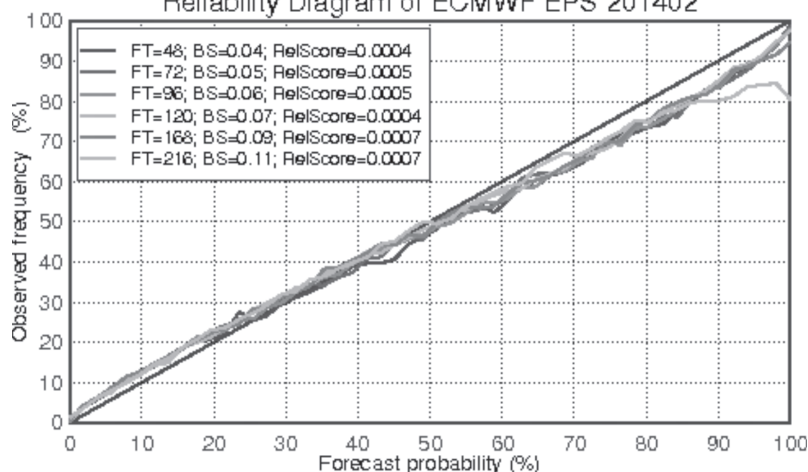
Таблица

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

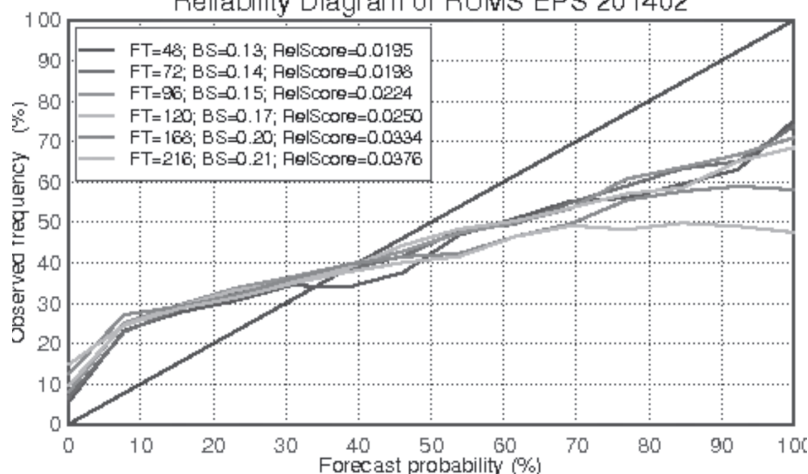
На рис. 4 представлены диаграммы надежности для прогнозов разных центров для события «Аномалия температуры на уровне 850 гПа меньше 1 стандартного отклонения от климата» для февраля 2014 года. В случае идеального прогноза предсказанная частота события и реально наблюдавшаяся частота события совпадают, 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

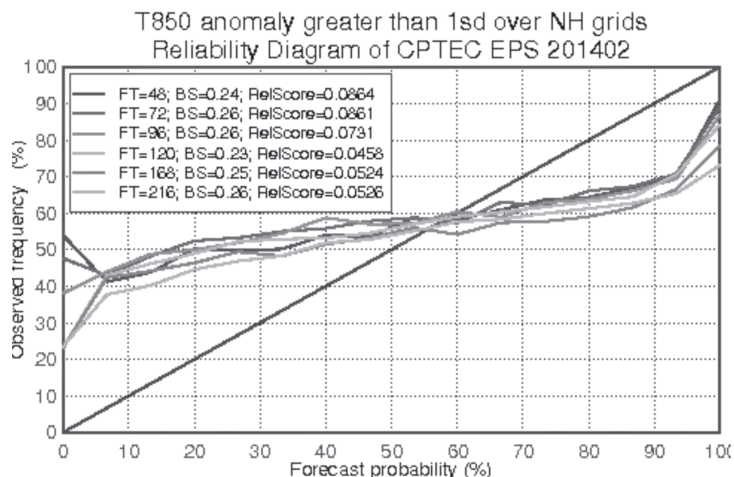
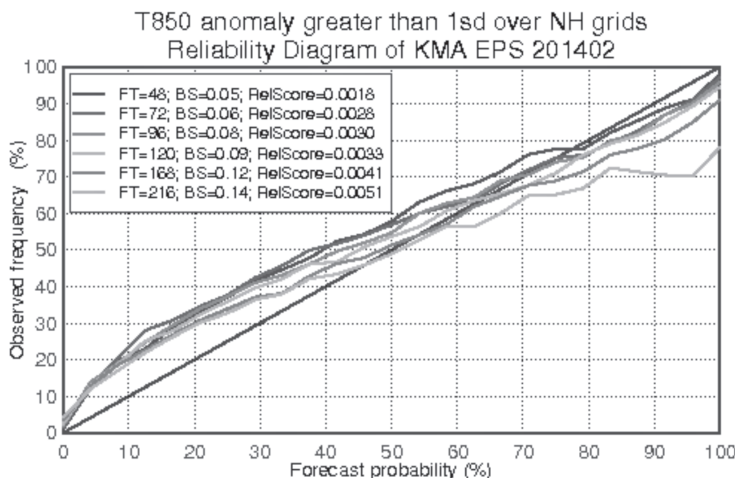


Рис. 4. Диаграммы надежности для ансамблевых прогнозов различных центров – ЕЦСПП (а), Гидрометцентр России (б), Корейская метеорологическая администрация (в), бразильский Центр прогнозирования погоды и климатических исследований (г) – для события Аномалия T850 < 1 std. Северное полушарие. Февраль 2014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