

УДК 551.509

## ВЫПУСК ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ В РАМКАХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕВЕРО-ЕВРАЗИЙСКОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА (СЕАКЦ)

*Д.Б. Киктев, М.А. Толстых, Р.Б. Зарипов, Е.Н. Круглова,  
И.А. Куликова, В.А. Тищенко, В.М. Хан*

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва  
khan@metcom.ru*

В статье дается описание технологии еженедельных выпусков глобальных вероятностных и детерминистических еженедельных и месячных прогнозов на базе модели ПЛАВ. Предусмотрены возможности реализации мультимодельного подхода, основанного на использовании моделей общей циркуляции атмосферы ПЛАВ и ФГБУ «ГГО». В рамках основной технологической линии создана схема детализации прогнозов температуры воздуха и осадков для 70 станций СНГ. Приводятся результаты мониторинга качества прогнозов в реальном режиме времени. В качестве дополнительной информации используются прогнозы индексов, характеризующих основные моды крупномасштабной изменчивости атмосферной циркуляции на Северном полушарии.

*Ключевые слова:* гидродинамические прогнозы, мультимодельные ансамбли, синоптико-статистическая интерпретация, индексы циркуляции, верификация прогнозов.

### Введение

Согласно классификации Всемирной метеорологической организации (ВМО), долгосрочными называются метеорологические прогнозы на срок от 30 суток до двух лет. Прогнозы на срок свыше двух лет уже относятся к прогнозам климата. Вместо термина «долгосрочный прогноз погоды» в настоящее время используется термин «долгосрочный метеорологический прогноз» (ДМП), так как объектами прогнозирования на долгие сроки являются не мгновенные значения метеорологических элементов, ассоциируемые со словом «погода», и не индивидуальные структуры в атмосферных течениях, а статистические характеристики состояния атмосферы в период прогноза. Физической основой долгосрочных прогнозов служат гипотезы о решающей роли внешних воздействий в долгопериодной динамике атмосферы. Предполагается, что для больших промежутков времени (сезон и более) состояние атмосферы уже не будет зависеть от начальных условий, а будет определяться притоками энергии извне.

Степень детализации сезонных прогнозов, обычно представляемых в терминах вероятностей трех категорий средних за период прогноза аномалий (выше/ниже/около нормы), не устраивает многих потребителей. В условиях возрастающих потребностей со стороны водного хозяйства, энергетики, сельского хозяйства и других отраслей экономики возникает необходимость в развитии систем прогнозирования на внутрисезонных интервалах времени. Прогнозы метеорологических параметров на интервалах времени от 10 суток до 1–3 месяцев занимают промежуточное положение между среднесрочными прогнозами (на период до 10 суток) и прогнозами на сезон.

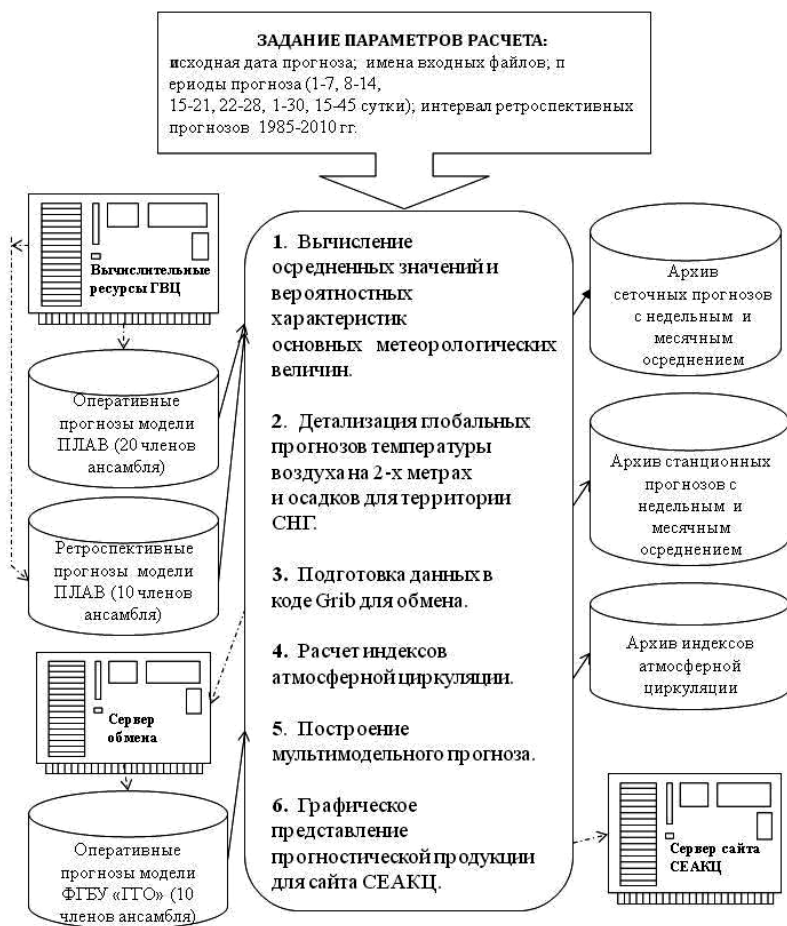
Трудности такого рода прогнозирования определяются необходимостью учета, с одной стороны, влияния медленно меняющихся внешних воздействий. С другой стороны, на внутрисезонных временных масштабах еще сохраняются элементы памяти о начальном состоянии системы «атмосфера – деятельный слой подстилающей поверхности». Возможности ДМП при этом зависят от относительной роли изменчивости, определяемой внешними вынуждающими воздействиями на атмосферу, в сравнении с ее собственной, «внутренней» изменчивостью, обусловленной динамической неустойчивостью атмосферных течений.

В настоящее время оперативные прогнозы на внутрисезонных интервалах времени выпускаются Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды, метеорологическими центрами Великобритании, США, Франции, Канады, Японии 1–2 раза в неделю. В 2013 году под эгидой Всемирной программы метеорологических исследований и Всемирной программы исследования климата ВМО стартовал пятилетний проект по внутрисезонному прогнозированию S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project), нацеленный на улучшение понимания процессов в системе «атмосфера – океан – суша – лед» на временных масштабах до сезона, повышение успешности прогнозов в этом временном диапазоне и ускорение их практического внедрения [25].

В России практическая деятельность в области ДМП ведется в Гидрометцентре России и в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ФГБУ «ГГО») [8, 9, 14, 16]. В рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) реализована технология оперативного выпуска долгосрочных прогнозов с недельной и месячной детализацией. Проведены совместные испытания прогнозов на основе технологий Гидрометцентра России и ГГО. В соответствии с Решением Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и геологическим прогнозам от 20 июня 2017 г. рекомендовано использовать прогнозы Гидрометцентра России и ГГО, а также мультимодельные прогнозы в информационном обеспечении СЕАКЦ со статусом «консультативные прогнозы» с публикацией полученных оценок успешности прогнозов на сайте.

## 1. Технологическая линия

В Гидрометцентре России по аналогии со схемой сезонного прогноза реализована технология выпуска долгосрочных прогнозов с недельной детализацией (рис. 1). Сходство технологий определяется единой вычислительной основой, которой является модель ПЛАВ, разработанная в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России [14, 16] со суточной дискретностью записи прогностической информации.



**Рис. 1.** Блок-схема технологической линии долгосрочных прогнозов с недельной и месячной дискретизацией, реализованной на сервере СЕАКЦ.

Долгосрочные прогнозы с недельной и месячной дискретизацией составляются один раз в неделю (в середине каждой недели) с осреднением 1–7 (1-я неделя), 8–14 (2-я неделя), 15–21 (3-я неделя), 22–28 (4-я неделя), 1–30 (1-й месяц) и 16-45 (2-й месяц) суток. При выборе данных в суточной

дискретности разработаны программы, позволяющие формировать по исходным данным интервалы осреднений переменной длины. Такая гибкость позволяет в случае необходимости изменить временные окна для прогноза и для оценки качества прогностической схемы (мониторинг).

Результаты интегрирования модели передаются по локальным и глобальным линиям связи. На специально выделенном сервере СЕАКЦ в операционной среде UNIX создан блок постобработки ансамблей численных долгосрочных прогнозов. Итоговой продукцией постобработки являются детерминистические и вероятностные прогнозы метеорологических полей, которые по локальной сети Гидрометцентра России передаются на сервер СЕАКЦ. Для обмена (с использованием внешнего сервера обмена) прогностическими данными между Гидрометцентром России и ГГО им. Воейкова созданы процедуры выделения и архивирования полей аномалий основных метеорологических величин и вероятностей по трем равновероятным градациям (ниже нормы, норма и выше нормы) за недели и месяцы (на срок до 1,5 месяца). Проведен предварительный анализ и согласование исходных фактических и климатических полей, используемых в Гидрометцентре России и ГГО. Полученные по глобальной сети прогностические данные модели ГГО используются для создания долгосрочного мультимодельного прогноза. Объединяются результаты расчетов средних ансамблевых аномалий (с исключенными систематическими ошибками) и вероятностей трех градаций, что позволяет получить добавочную стоимость за счет простого объединения ансамблей (в оперативном режиме формируются двадцать прогнозов по модели ПЛАВ и десять по модели ГГО).

В рамках основной технологической линии глобальных долгосрочных прогнозов метеорологических величин создана схема пространственной детализации прогнозов температуры воздуха и осадков для 70 станций СНГ. Блок статистической интерпретации, реализованный в вычислительной среде сервера СЕАКЦ, включает процедуры, позволяющие получить по результатам расчетов глобальных полей приземной температуры воздуха и осадков на основе модели ПЛАВ Гидрометцентра России и модели ГГО, значения температуры воздуха и осадков на станциях. В качестве основного метода обработки исходной информации используется метод билинейной интерполяции. Результатами являются прогностические значения температуры воздуха и осадков для 70 станций, расположенных на территории СНГ, полученные отдельно для каждой из четырех недель и двух месяцев (с нулевой и двухнедельной заблаговременностью).

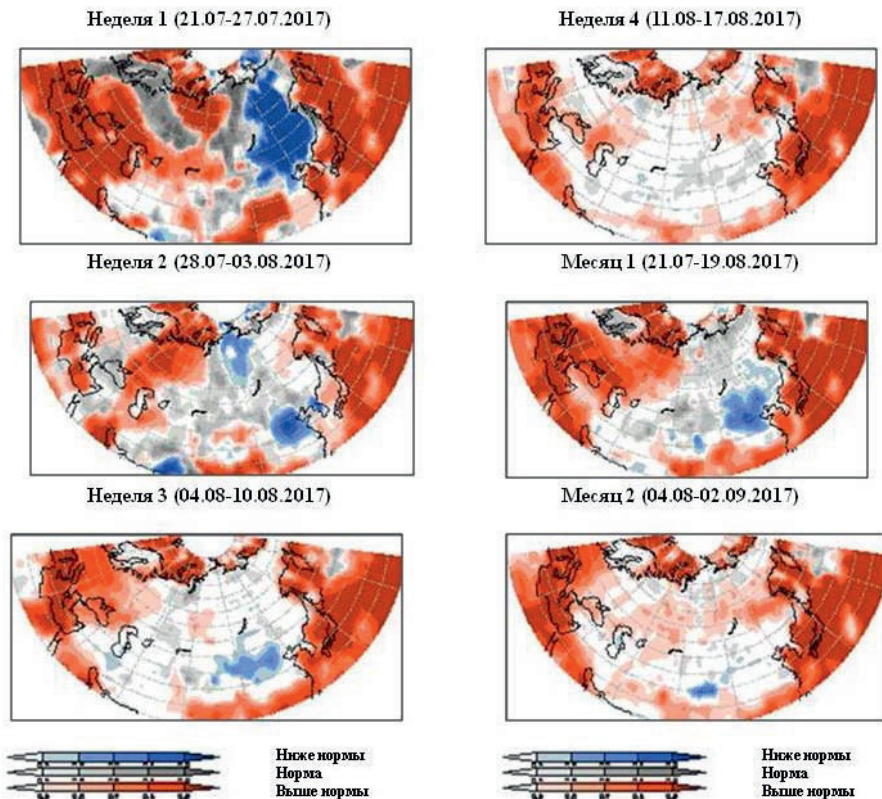
## **2. Основные виды продукции**

Информация о деятельности СЕАКЦ, результаты оперативной работы, научные и учебные материалы размещаются на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>). В список основной прогностической продукции входят глобальные поля

(на сетке с пространственным разрешением  $2,5 \times 2,5$  градуса широты и долготы) аномалий:

- геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа;
- температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа;
- атмосферного давления на уровне моря;
- приземной температуры воздуха;
- суммарных осадков.

На прогностической странице сайта представлены карты пространственного распределения средних по ансамблю аномалий (детерминированные прогнозы), а также вероятностей указанных выше метеорологических величин для трех основных градаций (ниже нормы, норма и выше нормы) с недельным и месячным разрешением. В целях кластеризации используются терцили, полученные на материалах ретроспективного интегрирования (1985–2010 гг.). Результаты прогнозов регулярно (раз в неделю) обновляются на сайте СЕАКЦ. На рис. 2 приводится пример прогностической продукции для региона Северной Евразии.



**Рис. 2.** Карты пространственного распределения мультимодельных недельных и месячных вероятностных прогнозов аномалий температуры воздуха по исходным данным за 27.07.2017 г.



На сайте также размещается информация об аномальных метеорологических ситуациях, полученная на основе синоптической интерпретации недельных и месячных прогнозов основных метеорологических величин, а также фактических данных.

### 3. Мониторинг качества прогнозов

Мониторинг качества прогнозов с недельной дискретизацией в реальном времени осуществляется в формате единой технологической линии еженедельных выпусков глобальных долгосрочных метеорологических прогнозов, развернутой и отлаженной на сервере СЕАКЦ.

На рис. 3 представлен блок технологической линии, предназначенный для оценки и анализа результатов численного интегрирования гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ПЛАВ Гидрометцентра России (НМС) и ГГО (МГО), а также детализированных с помощью процедуры билинейной интерполяции прогнозов температуры воздуха и осадков для 70 станций СНГ. В список верифицируемой прогностической продукции входят глобальные поля (на сетке с пространственным разрешением  $2,5 \times 2,5$  градуса широты и долготы) геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа, температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа, атмосферного давления на уровне моря, приземной температуры воздуха и суммарных осадков.

Мониторинг качества прогнозов проводится в оперативном режиме один раз в начале каждого месяца по мере поступления данных реанализа и наблюдений. В качестве эталонного архива с учетом соотношения оперативности и качества информации для оценки оправдываемости прогнозов используется реанализ NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 [21].

Расчет климатических характеристик производится по данным этого архива на основе базового периода с 1985 по 2010 г. Как для отдельных моделей, так и для мультимодельного ансамбля прогнозов строятся глобальные карты пространственного распределения показателей качества, а также рассчитываются осредненные оценки для различных регионов Земного шара (глобуса, Северного полушария, северных и южных тропиков, Северной Азии, Европы, СНГ и Арктики). Предусмотрена возможность дополнительного расчета показателей отдельно по точкам суши и по точкам моря во всех выделенных регионах, что может быть полезно для анализа физических блоков моделей.

Для станционных данных проводится оценка качества прогнозов приземной температуры воздуха и осадков. Основным эталонным массивом служит архив средних суточных значений температуры воздуха и осадков, полученный на базе архивов ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/data>) для 70 станций, расположенных на территории СНГ. Архив регулярно пополняется станционными данными базы МАКТ Гидрометцентра России. В рамках технологической линии разработаны и реализованы также программные средства пополнения баз фактических и прогностических данных, необходимых для оперативного или квазиоперативного функционирования схемы долгосрочного прогноза метеорологических условий с недельной дискретизацией.

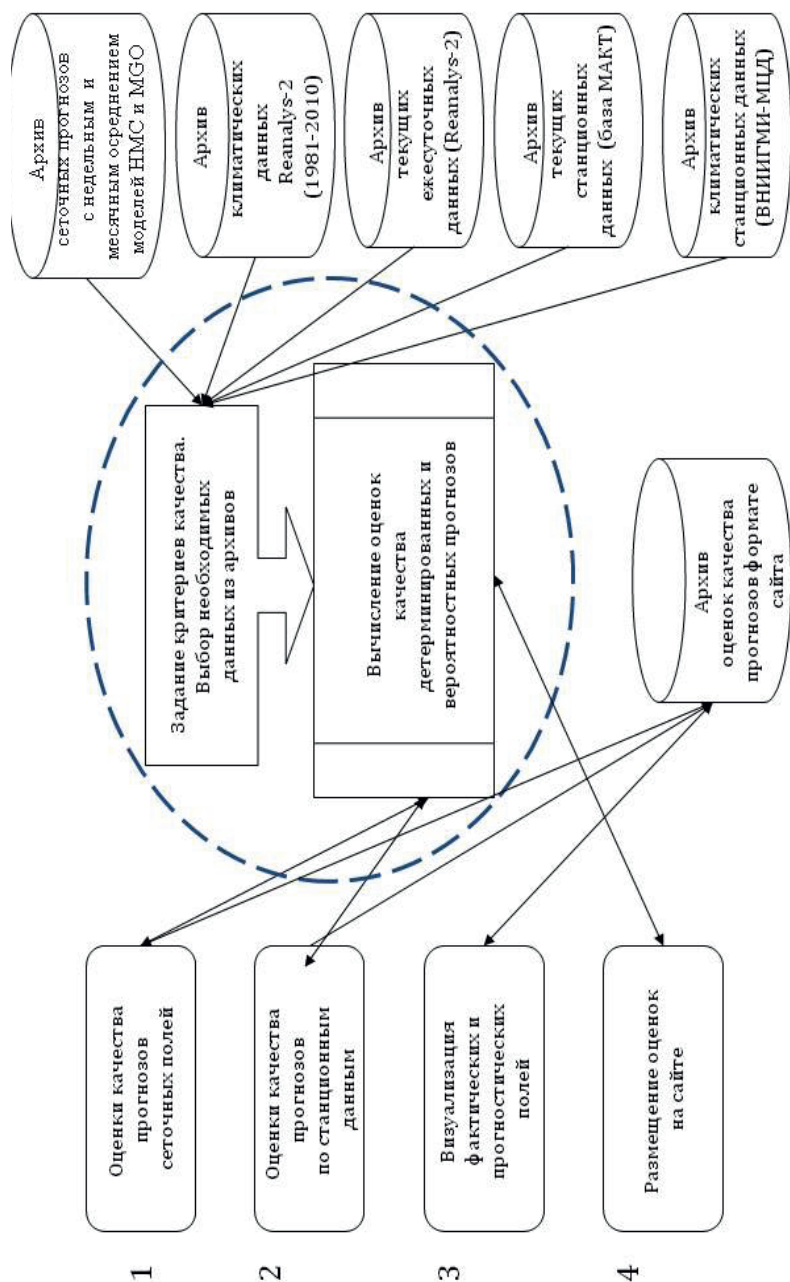


Рис. 3. Блок мониторинга качества прогнозов, реализованный на сервере SEAKC.

Одним из важнейших этапов мониторинга является визуализация прогностических данных, которая осуществляется в автоматическом режиме в графической среде GrADS. Визуальное сравнение путем сопоставления по месту (пространству) и по времени прогностических и фактических величин позволяет получить наиболее полную информацию о качестве прогнозов. Количественные оценки качества прогнозов, составленных с использованием гидродинамических моделей Гидрометцентра России и ГГО строятся с учетом рекомендаций ВМО [см., например, 7, 10] а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России.

В качестве основных оценок детерминистических прогнозов используются следующие показатели: коэффициент корреляции знаков  $\rho$ , относительная ошибка прогноза  $Q$ , средний квадрат ошибки (mean squared error) прогноза MSE, критерий качества по среднему квадрату ошибки MSSS, коэффициент корреляции аномалий (anomaly correlation coefficient) AC. Для оценки качества вероятностных прогнозов используется показатель ROC, подробно описанный в работе Муравьева и Вильфанда [11].

Ниже дается краткая характеристика качества прогнозов, полученных в ходе оперативных испытаний созданной технологии за период с 30 марта 2016 г. по 15 марта 2017 г. (51 случай). В табл. 1 приводятся средние значения для данного периода параметра MSSS, позволяющего определить преимущества методических прогнозов по сравнению с климатическими. Расчет статистической достоверности полученных оценок производится с помощью непараметрического метода повторных выборок с возвратом, известного как «бутстрэп» [18]. Повторные выборки (или «реплики») генерируются с помощью датчика случайных чисел в количестве, равном 100. При этом для проверки нулевой гипотезы при двустороннем тесте определяется доверительный интервал между квантилями 5 и 95 % ранжированного ряда разностей. Если ноль лежит за пределами доверительного интервала, нулевая гипотеза (между климатическими и методическими прогнозами нет отличий) отклоняется при 10%-ном уровне значимости.

Как известно, для средних значений и для многих других статистических характеристик ширина интервала, соответствующего распределению бутстрэпа, и ширина интервала, соответствующего реальному распределению, как правило, совпадают [2].

Как видно из табл. 1, для первого временного интервала (1-я неделя) качество прогнозов выше климатического. Для полей давления и температуры воздуха наименьшие отличия от климатических на данном временном интервале характерны для тропических широт. На втором временном интервале (2-я неделя) качество прогнозов резко падает. Тем не менее полезный сигнал в полях H500 и температуры воздуха присутствует. На временных интервалах 3 и 4-я неделя наилучшие оценки прогнозов отмечаются в тропических широтах, где в связи с наличием медленно меняющихся условий (термическое состояние океана, Осциляция Мадде-



на – Джулиана – важнейшая мода внутрисезонной (30–90 суток) изменчивости тропической атмосферы), предсказуемость на длительных интервалах интегрирования повышается. В умеренных широтах на третьем и четвертом интервалах интегрирования (за пределами интервала практической предсказуемости, равного примерно двум неделям), в отличие от тропических широт, методические прогнозы не содержат полезного сигнала и практически не отличаются от климатических прогнозов.

Существование предсказуемости второго рода определяет возможности прогноза крупномасштабных структур атмосферной циркуляции, а также статистических характеристик метеорологических полей на месячных и более длительных интервалах времени. На пятом временном интервале (1-й месяц) качество методических прогнозов с учетом доверительных интервалов снова оказывается выше климатических. Исключением являются прогнозы осадков, качество которых за пределами первого временного интервала (1-я неделя) оказывается неудовлетворительным. На шестом временном интервале наиболее предсказуемыми оказываются атмосферные процессы, протекающие в тропиках. Таким образом, результаты верификации свидетельствуют о том, что методические прогнозы во многих случаях оказываются лучше климатических и могут использоваться как вспомогательные в оперативной практике.

Блок верификации и мониторинга качества прогнозов является важнейшей составляющей технологической линии. Развитие и создание новых версий гидродинамических моделей требуют знания характеристик качества, способных выявить не только систематические ошибки, оценить систематическое поведение прогностических систем, но и проводить исследования предсказуемости геофизических процессов. Оценки качества прогнозов необходимо учитывать в процессе оперативной практики и ориентироваться на географические регионы с наиболее высокой их надежностью.

#### **4. Моделирование низкочастотной изменчивости**

Эффективность прогностической системы на длительных интервалах времени определяется ее способностью воспроизводить крупномасштабные структуры, связанные с низкочастотной изменчивостью атмосферы. Условно принято, что диапазон низких частот в общей циркуляции атмосферы охватывает колебания за пределами синоптической изменчивости, обусловленной формированием и разрушением вихрей. Как известно, волны синоптического масштаба (ложбины и гребни, циклоны и антициклоны) являются проявлением бароклинной неустойчивости – обычного свойства атмосферной циркуляции средних широт, связанного с вращением Земли и наличием горизонтальных контрастов температуры (вертикальным сдвигом ветра). Поскольку время жизни бароклинного вихря составляет примерно 7–10 суток, под низкочастотной изменчивостью понимаются атмосферные флуктуации с временными масштабами порядка 7 дней и больше [3, 17].

**Таблица 1.** Средние оценки качества (по MSSS) прогнозов H500, MSLP, T850, TRSF и PREC за период с 30 марта 2016 г. по 15 марта 2017 г. (51 случай) для трех регионов: СНГ, СП (Северное полушарие) и ТР (тропики). Красным цветом обозначены статистически значимые (10%-ный уровень) различия по отношению к климату

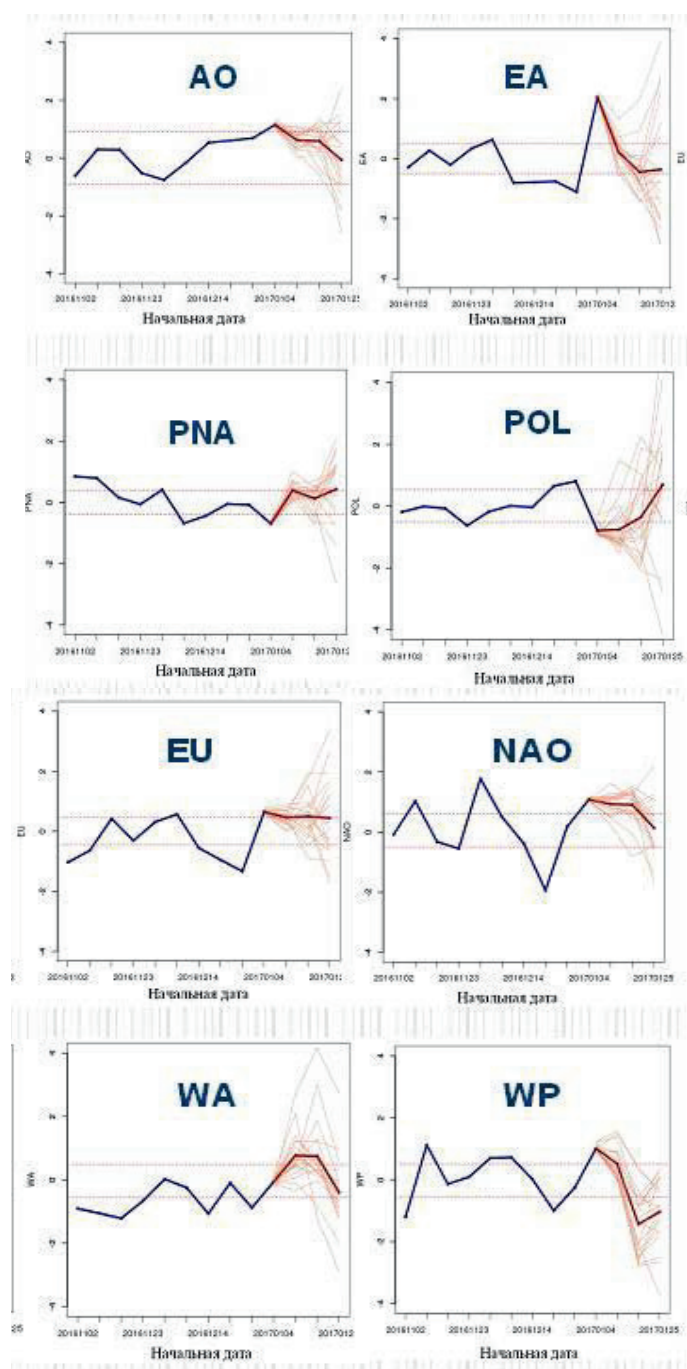
|                  | H500  |       |      | MSLP  |       |       | T850  |       |       | TRSF  |       |      | PREC  |       |       |
|------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                  | СНГ   | СП    | ТР   | СНГ   | СП    | ТР    | СНГ   | СП    | ТР    | СНГ   | СП    | ТР   | СНГ   | СП    | ТР    |
| 1 неделя ГМЦ     | 0,74  | 0,72  | 0,75 | 0,66  | 0,63  | 0,42  | 0,67  | 0,63  | 0,33  | 0,52  | 0,35  | 0,34 | -0,11 | -0,02 | 0,01  |
| 1 неделя ГГО     | 0,79  | 0,78  | 0,78 | 0,72  | 0,7   | 0,45  | 0,73  | 0,69  | 0,29  | 0,64  | 0,64  | 0,36 | 0,19  | 0,17  | -0,07 |
| 1 неделя ГМЦ+ГГО | 0,82  | 0,8   | 0,83 | 0,76  | 0,74  | 0,6   | 0,76  | 0,73  | 0,4   | 0,66  | 0,59  | 0,43 | 0,18  | 0,19  | 0,07  |
| 2 неделя ГМЦ     | -0,06 | -0,1  | 0,51 | -0,25 | -0,23 | -0,23 | -0,05 | -0,07 | 0,04  | 0     | -0,1  | 0,04 | -0,32 | -0,27 | -0,05 |
| 2 неделя ГГО     | 0,22  | 0,2   | 0,59 | 0,02  | 0,02  | 0,01  | 0,25  | 0,18  | 0,06  | 0,23  | 0,26  | 0,16 | -0,02 | -0,04 | -0,1  |
| 2 неделя ГМЦ+ГГО | 0,2   | 0,19  | 0,63 | 0,02  | 0,06  | 0,1   | 0,25  | 0,2   | 0,15  | 0,25  | 0,22  | 0,2  | -0,04 | -0,04 | 0,01  |
| 3 неделя ГМЦ     | -0,28 | -0,25 | 0,41 | -0,36 | -0,34 | -0,33 | -0,22 | -0,18 | -0,02 | -0,12 | -0,12 | 0,04 | -0,18 | -0,18 | -0,05 |
| 3 неделя ГГО     | -0,01 | 0,03  | 0,51 | -0,14 | -0,11 | -0,12 | 0     | 0,03  | 0,03  | 0,04  | 0,14  | 0,11 | -0,08 | -0,08 | -0,1  |
| 3 неделя ГМЦ+ГГО | -0,05 | -0,01 | 0,52 | -0,15 | -0,11 | -0,05 | -0,01 | 0,03  | 0,09  | 0,05  | 0,12  | 0,17 | -0,06 | -0,06 | -0,01 |
| 4 неделя ГМЦ     | -0,14 | -0,08 | 0,39 | -0,11 | -0,14 | -0,24 | -0,17 | -0,08 | 0,02  | -0,12 | -0,09 | 0,05 | -0,12 | -0,08 | -0,03 |
| 4 неделя ГГО     | -0,12 | -0,06 | 0,5  | -0,13 | -0,16 | -0,13 | -0,09 | -0,04 | 0,04  | -0,01 | 0,1   | 0,13 | -0,07 | -0,09 | -0,1  |
| 4 неделя ГМЦ+ГГО | -0,07 | -0,02 | 0,51 | -0,06 | -0,08 | -0,05 | -0,06 | 0     | 0,1   | 0     | 0,09  | 0,16 | -0,05 | -0,04 | -0,01 |
| 1 месяц ГМЦ      | 0,09  | 0,11  | 0,72 | -0,05 | -0,09 | -0,14 | 0,15  | 0,15  | 0,22  | 0,09  | -0,02 | 0,24 | -0,11 | -0,12 | -0,01 |
| 1 месяц ГГО      | 0,24  | 0,27  | 0,77 | 0,06  | 0,01  | 0     | 0,32  | 0,31  | 0,2   | 0,33  | 0,43  | 0,33 | 0,02  | -0,01 | -0,08 |
| 1 месяц ГМЦ+ГГО  | 0,24  | 0,28  | 0,78 | 0,09  | 0,08  | 0,12  | 0,31  | 0,32  | 0,28  | 0,31  | 0,33  | 0,36 | 0,03  | 0,03  | 0,05  |
| 2 месяц НМС      | -0,13 | -0,03 | 0,62 | -0,13 | -0,21 | -0,26 | -0,12 | 0,02  | 0,12  | -0,09 | -0,07 | 0,14 | -0,11 | -0,1  | -0,03 |
| 2 месяц ГГО      | -0,08 | 0,02  | 0,69 | -0,14 | -0,19 | -0,23 | -0,01 | 0,07  | 0,11  | 0,09  | 0,26  | 0,23 | -0,07 | -0,11 | -0,15 |
| 2 месяц ГМЦ+ГГО  | -0,04 | 0,07  | 0,72 | -0,06 | -0,11 | -0,04 | 0     | 0,11  | 0,19  | 0,08  | 0,2   | 0,26 | -0,04 | -0,04 | 0     |

Заметим, что синоптические методы долгосрочных прогнозов Гидрометцентра России на протяжении многих лет базировались на понятиях естественного синоптического периода, естественного синоптического района и естественного синоптического сезона [1], тесно связанных с пространственными и временными масштабами крупномасштабных структур атмосферной циркуляции. В [4, 6] показана целесообразность использования в качестве характеристик низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции индексов дальних связей. Блок расчета индексов по аналогии со схемой сезонного прогноза является составной частью технологической линии детализированных прогнозов СЕАКЦ. В оперативном режиме наряду с прогнозами глобальных метеорологических полей на базе модели ПЛАВ составляются недельные и месячные прогнозы 8 индексов: **EA** (Восточно-атлантическое колебание), **WA** (Западно-атлантическое колебание), **EU** – (Евразийское колебание), **WP** (Западно-тихоокеанское колебание), **PNA** (Тихоокеанское-северо-американское колебание), **NAO** (Северо-атлантическое колебание), **POL** (Полярное колебание), **AOS** (Арктическая осцилляция).

На рис. 4 приводятся примеры прогностических ансамблей вышеназванных индексов атмосферной циркуляции. Для оценки влияния крупномасштабных атмосферных процессов, характеризующихся данными индексами, на региональный режим температуры воздуха и осадков можно воспользоваться размещенными на сайте СЕАКЦ (<http://seakc.meteoinfo.ru/forecast/259>) сборными композитными картами, на которых представлены очаги положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха и осадков для различных фаз индексов циркуляции в зимний, весенний, летний и осенний периоды. Полученные результаты являются статистически значимыми и позволяют сформулировать некоторые климатологические приемы уточнения долгосрочных прогнозов с учетом результатов композитного анализа.

Так, например, если на прогностической карте поверхности 500 гПа прослеживаются структуры, связанные с положительными или отрицательными фазами того или иного индекса, следует с большей вероятностью ожидать в данном географическом районе представленные на композитных картах градации (выше или ниже нормы) температуры и осадков.

Другой аспект, связанный с использованием прогнозов индексов, заключается в априорной оценке качества прогнозов. В процессе многолетней синоптической практики установлена связь между режимами атмосферной циркуляции и качеством прогнозов. Согласно Пальмеру [24], наиболее высокие оценки качества соответствуют положительным значениям индекса PNA и наоборот. При этом предполагается, что рост ошибки прогноза связан с ростом баротропной неустойчивости атмосферы, которая, в свою очередь весьма тесно зависит от знака PNA. Обсуждаются также связи PNA с Эль-Ниньо. О'Лэник и Ливзи [23] исследовали связи между ошибками среднесрочных прогнозов и различными режимами атмосферной циркуляции при помощи метода главных компонент с вращением.



**Рис. 4.** Прогнозы индексов атмосферной циркуляции на недельных интервалах времени (синяя кривая – данные реанализа, красная – 20 членов ансамбля прогнозов, жирная красная – среднее по ансамблю).

Кроме PNA, выделены и другие моды низкочастотной изменчивости, влияющие на качество пентадных и декадных прогнозов. Аналогичные выводы о связи качества гидродинамических прогнозов с режимами атмосферной циркуляции получены и в ряде других исследований [5, 12, 13, 19–22, 26]. Ориентированный на режимы циркуляции подход, основанный на совместном использовании динамических прогнозов и синоптико-статистических методов может способствовать повышению качества долгосрочных прогнозов и увеличению «предела предсказуемости».

### Заключение

Рассмотрены основные особенности технологической линии долгосрочных метеорологических прогнозов, реализованной в ФГБУ «Гидрометцентр России» на сервере СЕАКЦ, в рамках которой составляются недельные и месячные прогнозы основных метеорологических величин. Вычислительное ядро схемы, развернутой на вычислительных ресурсах ГВЦ Росгидромета, составляет глобальная гидродинамическая модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ (совместная разработка Института вычислительной математики РАН и Гидрометцентра России). Ведется постоянная работа по созданию новых версий данной модели. В частности, улучшены блоки параметризации коротко- и длинноволновой радиации, облачности, пограничного слоя, описания льда, озонового слоя [15].

В целях повышения качества прогнозов используется мультимодельный подход, основанный на использовании моделей общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России и ГГО.

Последующая обработка ансамблевых прогнозов, поставляемых от разных моделей (в оперативном режиме формируются двадцать прогнозов по модели ПЛАВ и десять – по модели ГГО), позволяет устранить систематические ошибки моделей и улучшить качество прогнозов за счет простого объединения ансамблей.

Оценки качества прогнозов строятся с учетом рекомендаций ВМО, а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России. В рамках основной технологической линии производится мониторинг качества, позволяющий оценивать оправдываемость прогнозов в реальном режиме времени. При практическом использовании прогнозов необходимо учитывать оценки их качества.

Качество долгосрочных прогнозов сильно меняется в зависимости от региона, сезона и режима атмосферной циркуляции. В связи с этим в оперативном порядке с использованием различных индексов решается задача прогноза режимов циркуляции, более устойчивых и более предсказуемых, чем мгновенные состояния атмосферы. Построены сборные композитные карты с учетом различных фаз индексов, которые могут использоваться для уточнения долгосрочных прогнозов, а также для априорной оценки их качества.

Планируется дальнейшее развитие и усовершенствование технологии за счет введения новых блоков и программных средств. Основной акцент



при этом делается на усовершенствование гидродинамической модели ПЛАВ, а также проведение исследований источников потенциальной предсказуемости эволюции атмосферы на внутрисезонных временных масштабах. Особое внимание предполагается уделить исследованию предсказуемости экстремальных метеорологических явлений, с которыми связаны стихийные бедствия, наносящие большой ущерб экономике страны.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-37-00053 П) в Гидрометцентре России.

Методика анализа прогнозов индексов циркуляции, описанная в разделе 4, разработана при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-01227).

Поступила в редакцию 22.09.2017 г.

### Список использованных источников

1. Багров Н.А., Кондратович К.В., Педь Д.А., Узрюмов А.И. Долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 247 с.
2. Диаконис П., Эфрон Б. Статистические методы с интенсивным использованием ЭВМ // В мире науки. 1993. № 3. С. 60-72.
3. Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М.: ИВМ РАН, 2007. 283 с.
4. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть 1. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 5-22.
5. Крыжов В.Н., Горелиц О.В. Арктическая осцилляция и ее влияние на температуру и осадки Северной Евразии в XX веке // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 5-19.
6. Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть 2. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 5-16.
7. Материалы семинара рабочей группы ВМО (29 января – 2 февраля 2007 г.). [http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif\\_web\\_page.html](http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.html).
8. Мирвис В.М., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. Новая технология ансамблевого гидродинамического прогноза на 45 суток и региональные оценки успешности прогнозов для Северной Евразии // Труды ГГО. 2014. Вып. 570. С. 5-33.
9. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон // Труды ГГО. 2008. Вып. 558, С. 3-40.
10. Муравьев А.В. Стандартизированная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов. (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, лтд, 2010. С. 264-288. [http://method.hydromet.ru/publ/books/80\\_years/murav.pdf](http://method.hydromet.ru/publ/books/80_years/murav.pdf).
11. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 24-34.
12. Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Казначеева В.Д. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. Часть 1. Основные конструктивные и технические характеристики динамико-статистической схемы долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 28-36.
13. Муравьев А.В., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Казначеева В.Д. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. Часть 2. Условия эксперимента и результаты прогноза // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 5-15.
14. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ФАО ФОП, 2010. 111 с.
15. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М.,

- Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. №. 6. С. 25-35.
16. Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В. Воспроизведение атмосферной циркуляции на сезонных масштабах новой версией полулагранжевой модели атмосферы // Известия РАН. ФАО. 2010. Т. 46, № 2. С. 149-160.
17. Уоллес Дж., Блэкмон М. Наблюдаемая низкочастотная изменчивость атмосферы. В кн. Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере / под ред. Б. Хоскина, Р. Пирса. М.: Мир, 1988. С. 66-109.
18. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа. М.: Финансы и статистика, 1988. 263 с.
19. Branstator G. Spatial filtering of daily and monthly mean forecasts // WMO/Td-No. 395. ICTP/WMO international technical conference on long-range weather forecasting research, Trieste, Italy, 8–12 April 1991. P. 35-38.
20. Deque M. 10-day predictability of the northern hemisphere winter 500-mb height by ECMWF operational model // Tellus. 1988. Vol. 40A. P. 26-36.
21. Kanamitsu M., Ebisuzaki W.I, Woollen J., Yang Shi-Keng, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2002. Vol. 83. P. 1631–1643.
22. Maedo S., Kudo T., Yamada S. Dynamical one-month forecast experiments with JMA global prediction model // Res. Act. Atm. Ocean. Model. Rep. No.18, January 1993. WMO/TD-No. 533. P. 6.35-6.36.
23. O'Lenic E.A., Livezey R.E. Relationships between systematic errors in medium range numerical forecasts and some of the principal modes of low-frequency variability of the northern hemisphere 70 mb circulation // Mon. Wea. Rev. 1989. Vol. 117, No. 6. P. 1262-1280.
24. Palmer T. Medium and extended range predictability and stability of the Pacific/North American mode. Quart // J. Roy. Met. Soc. 1988. Vol. 114. P. 691-713.
25. Sub-Seasonal to Seasonal Prediction Research Implementation Plan. [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/S2S\\_Implem\\_plan\\_en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/S2S_Implem_plan_en.pdf)
26. Yamada S., Maeda S., Gambo K. Principal modes of atmospheric variability in the northern hemisphere winter and the role of their modes associated with the extended range forecasting // Res. Act. Atm. Ocean. Model. Rep. No. 23, February 1996. WMO/TD-No 34. P. 2.75-2.76.

## SUMMARIES

**Issue of detailed meteorological forecasts in North Eurasian Climate Centre (NEACC)/** Kiktev D.B., Tolstykh M.A., Zaripov R.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tishenko V.A., Khan V.M. // Proceedings of Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 366. P. 14-28.

The article describes the technology of weekly issues of global probabilistic and deterministic forecasts for a week and a month implemented in NEACC on the basis of a semi-Lagrangian global finite-difference model of the general atmospheric circulation of the Hydrometeorological Center of Russia (SLAV). The possibilities of implementing a multi-model approach based on the use of models of the general circulation of the atmosphere of Hydrometeorological Center of Russia and the Voikov Main Geophysical Observatory are provided. The detailed scheme of air temperature and precipitation forecasts for 70 stations of CIS was created within the framework of the main technological line. The results of real-time forecast quality monitoring are given. As additional information, forecasts of indices characterizing the main modes of large-scale variability of atmospheric circulation in the northern hemisphere are used.

*Keywords:* hydrodynamic forecasts, multi-model ensembles, synoptic-statistical interpretation, indices of circulation, forecasts verification.