

УДК 551.5

Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России

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

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

Рассматриваются основные методы прогноза, используемые в оперативной практике Гидрометцентра России. Подчеркивается особая роль развития и совершенствования гидродинамических моделей в целях увеличения предсказуемости и повышения качества прогнозов. Представлены основные виды официальной и экспериментальной продукции, выпускаемой Гидрометцентром России и СЕАКЦ. В рамках концепции MOS с целью повышения качества прогнозов приземной температуры и осадков реализована схема статистической интерпретации гидродинамических прогнозов, полученных на базе модели ПЛАВ. Показана важная роль ансамблевых, в том числе мультимодельных прогностических систем для прогноза характеристик экстремальных метеорологических явлений на сезонных и внутрисезонных масштабах времени. Продемонстрированы возможности прогнозирования волн тепла на внутрисезонных (до 45 сут) интервалах времени на базе гидродинамического моделирования. Представлены примеры консенсусных прогнозов, выпускаемых в ходе сессий Северо-Евразийских климатических форумов. Определены основные направления и перспективы дальнейшего развития и совершенствования методов долгосрочных прогнозов.

Ключевые слова: технологическая линия, глобальные долгосрочные прогнозы, синоптико-статистическая интерпретация, индексы циркуляции, оценки качества прогнозов, консенсусные прогнозы

Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia

***R.M. Vilfand, R.B. Zaripov, D.B. Kiktev, E.N. Kruglova, V.N. Kryjov,
I.A. Kulikova, V.A. Tischenko, M.A. Tolstych, V.M. Khan***

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

The basic forecasting methods used in the operational practice of the Hydrometcentre of Russia are discussed. The special role of the development and improvement of hydrodynamic models to increase the predictability and to improve the quality of forecasts is emphasized. The main types of operational and experimental products issued by the Hydrometcentre of Russia and NEACC are presented. A statistical interpretation scheme for hydrodynamic forecasts obtained on the basis of the SL-AV model is implemented in the framework of the MOS concept in order to improve the quality of surface temperature and precipitation forecasts. The important role of ensemble (including multimodel) forecasting systems for predicting the characteristics of extreme meteorological phenomena

on seasonal and intra-seasonal time scales is shown. The potential of predicting heat waves on intraseasonal (up to 45 days) time intervals based on the hydrodynamic modeling is demonstrated. The examples of consensus forecasts issued during the sessions of the North Eurasian Climate Forums are presented. The main directions and prospects of further development and improvement of long-term forecasting methods are outlined.

Keywords: technology line, global long-range forecasts, synoptic-statistical interpretation, circulation indices, forecast skill scores, consensus forecasts

Введение

В соответствии с общепринятой терминологией долгосрочными называют метеорологические прогнозы на срок от 30 суток до года. Долгосрочный метеорологический прогноз (ДМП) является составной частью климатического прогнозирования, к которому также относятся прогнозы с расширенным сроком действия (от 10 до 30 дней), межгодовой изменчивости (от одного до нескольких лет), прогнозы на десятилетия [43]. Объектами прогнозирования на длительных интервалах времени служат не мгновенные значения метеорологических величин, ассоциируемые со словом «погода», а вероятностные характеристики ожидаемых распределений, такие как, например, осредненные за месяц и сезон аномалии прогностических переменных или вероятности градаций аномалий (ниже нормы, норма и выше нормы). В связи с этим более предпочтительным является использование термина ДМП, а не «долгосрочный прогноз погоды» [6].

В Гидрометцентре России ДМП занимают особое место и имеют историю более чем полувековой давности. Разработанный Б.П. Мультиановским в 30-х годах прошлого века и получивший дальнейшее развитие в трудах С.Т. Пагавы и его последователей синоптический метод базируется на глубоком анализе эволюции синоптических процессов, протекающих в атмосфере в масштабах всего Северного полушария [1, 24]. В 80-е и 90-е годы прошлого столетия были предприняты многочисленные попытки объективизации синоптического метода (выбора аналогов, реперных процессов, естественных синоптических периодов и сезонов, элементарных синоптических процессов и т. д.) с помощью различных процедур, основанных на оценках плотностей распределения вероятностей, эвристических алгоритмах, автоматической классификации. Методология макрометеорологического анализа крупномасштабной атмосферной циркуляции с использованием количественных критериев успешно используется в отделе долгосрочных прогнозов погоды (ОДПП) Гидрометцентра России при составлении предварительного прогноза на месяц.

В последние годы в связи с бурным развитием вычислительных и информационных технологий основные акценты в развитии и совершенствовании ДМП переносятся в область гидродинамического моделирования. В Гидрометцентре России при составлении месячного и сезонного прогноза основных метеорологических полей в экспериментальном

порядке успешно используется полулагранжева глобальная конечно-разностная модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ [28, 29]. Ведется постоянная работа по созданию новых версий данной модели [30]. Глобальные ансамблевые прогнозы на 3 месяца с месячной заблаговременностью, полученные на базе ПЛАВ, в рамках международного сотрудничества ежемесячно составляются и направляются в Азиатско-Тихоокеанский климатический центр (АРСС) и в Ведущий центр ВМО по мультимодельным долгосрочным прогнозам (WMO Lead Centre for MME LRF). Активная международная деятельность в сфере ДМП позволила Гидрометцентру России войти в число утвержденных ВМО Центров – Производителей Глобальных долгосрочных Прогнозов (ЦПП). Глобальные сезонные гидродинамические прогнозы сегодня выпускают на регулярной основе тринадцать ЦПП: Бразилиа, Вашингтон, Мельбурн, Монреаль, Москва, Оффенбах, Пекин, Претория, Реддинг, Сеул, Токио, Тулуза, Экзетер. В Сеуле, Республика Корея, создан Ведущий центр ВМО по мультимодельным долгосрочным ансамблевым прогнозам (<http://www.wmolc.org>), представляющий в унифицированном виде продукцию ЦПП авторизованным пользователям. С 2016 года Гидрометцентр России участвует в международном научном проекте "Subseasonal to seasonal prediction project" (<http://www.s2sproject.org>), целью которого является исследование предсказуемости атмосферы и успешности метеорологических прогнозов с заблаговременностью до 2 месяцев. Ежедневно подготавливаемые в Гидрометцентре России прогнозы ПЛАВ с заблаговременностью до 2 месяцев поступают в базы данных проекта [44].

Особое внимание в последние годы уделяется специализированному обеспечению ДМП и взаимодействию с пользователями на региональном уровне. В этих целях ВМО инициировало процесс создания региональных форумов по ориентировочным прогнозам климата (РКОФ) и региональных климатических центров (РКЦ). В Росгидромете эти задачи успешно реализуются в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ), который начиная с 2008 г. выполняет целый ряд функций по климатическому обслуживанию в Северной Евразии в качестве Регионального климатического центра, аккредитованного Всемирной Метеорологической Организацией. В его состав входят семь учреждений Росгидромета и национальные метеослужбы стран СНГ, координирующая роль закреплена за Гидрометцентром России. Информация о деятельности СЕАКЦ, результаты оперативной работы по мониторингу и прогнозированию короткопериодных колебаний климата, научные и учебные материалы размещаются на сайте СЕАКЦ на русском и английском языках (<http://neacc.meteoinfo.ru/>).

В данной статье приводится описание основных методов составления и выпуска вероятностных и детерминистических прогнозов на месяц и сезон, которые используются в Гидрометцентре России. Особое внимание

уделяется оперативной деятельности по выпуску месячных прогнозов различной заблаговременности с использованием синоптико-статистических методов. Гидродинамические прогнозы на сезон в большинстве мировых климатических центрах носят экспериментальный характер. В Гидрометцентре России ежемесячная процедура составления гидродинамических прогнозов, рассылки результатов и расчетов оценок качества осуществляется в рамках специализированной технологической линии, развернутой на сервере СЕАКЦ. Результаты вероятностных прогнозов сопровождаются синоптической интерпретацией, или обзорной информацией, которая выводится в определенном таблично-текстовом формате, дублируется на английском языке и размещается на сайте СЕАКЦ с использованием локальных и глобальных сетей.

Оперативная деятельность

В России месячные прогнозы имеют долгую историю и составляются с 1933 года на основе методических разработок Б.П. Мультиановского. Позже С.Т. Пагава и его последователи предложили подходы к усовершенствованию макросиноптического анализа атмосферной циркуляции с введением понятий естественный синоптический (е.с.) район, е.с. период, е.с. сезон и учетом преобладающих тропосферных переносов в крупных регионах. При составлении долгосрочных прогнозов по методу Мультиановского – Пагавы особая роль отводится анализу крупномасштабных атмосферных процессов в предшествующем трехмесячном периоде, подбору аналогов по различным параметрам к последним е.с. сезонам, определению ожидаемых типов процессов на основе исследования ритмичности атмосферы и предвестников в предыдущем е.с. сезоне. По результатам комплексного анализа производится выбор наилучшего года-аналога. В последние годы при составлении прогноза на основе метода Мультиановского – Пагавы используется автоматизированная система получения исходной информации, поиска аналогов и построения карт [34]. Прогноз выпускается с месячной заблаговременностью и используется в качестве *предварительного*. К преимуществам данного прогноза относятся низкое потребление вычислительных ресурсов и вместе с тем неплохие показатели оправдываемости, что обеспечивается высоким профессиональным уровнем синоптиков-долгосрочников отдела долгосрочных прогнозов погоды (ОДПП) Гидрометцентра России. В качестве вспомогательного при составлении прогнозов с месячной заблаговременностью используется метод временных аналогов [25].

Наряду с прогнозом месячной заблаговременности в ОДПП выпускается оперативный прогноз средней месячной температуры с нулевой заблаговременностью на основе комплексирования трех разных подходов в соответствии с решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) (от 29 октября 2002 г. и 4 апреля 2006 г.). Один из этих подходов

использует инерционную связь между аномалией температуры воздуха первой декады и аномалией всего месяца, в который она входит [13]. Прогноз составляется на основе статистической интерпретации среднесрочного прогноза гидродинамических моделей атмосферы на первую декаду прогнозируемого месяца [4]. Данный прогноз имеет достаточно высокую оправдываемость [5].

Второй подход представлен прогнозами, составляемыми в отделе гидродинамических методов долгосрочных прогнозов, и основан на статистической интерпретации прогнозов двух гидродинамических моделей: модели ПЛАВ [28, 29] и модели Национального Центра атмосферных исследований США (NCER). Статистическая интерпретация выполняется в рамках регрессионной модели [21, 22]. В прогнозе приземной температуры воздуха используется концепция «идеального прогноза», в которой учитываются синхронные и асинхронные связи между фактическими значениями предикторов и предиктантов. Предиктантами служат средние за 30 дней значения приземной температуры воздуха на 70 станциях СНГ, предикторами являются 5- и 10-дневные прогностические средние значения высоты изобарической поверхности 500 гПа (H500) и температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа (T850), характеризующие, соответственно, термическое состояние подстилающей поверхности и циркуляцию атмосферы в средней тропосфере.

Третий подход, реализованный в ГГО, базируется на результатах интегрирования глобальной спектральной модели атмосферы. В схеме ГГО температура воздуха определяется непосредственно на основе результатов гидродинамического моделирования, а коррекция систематических ошибок производится с использованием архивов ретроспективных прогнозов и последующей Фурье-аппроксимации сезонного хода [17, 18]. Таким образом, комплексный прогноз является результатом осреднения трех подходов, первые два из которых базируются на результатах численного гидродинамического моделирования, как правило, за первую декаду месяца – периода, связанного с предсказуемостью первого рода.

Комплексный прогноз успешно используется как основной прогноз аномалий приземной температуры воздуха при составлении синоптиками-долгосрочниками окончательного официального оперативного прогноза, который представляется в месячном бюллетене погоды. Прогноз месячных сумм осадков составляется путем подбора наилучших аналогов к полям спрогнозированной средней месячной температуры и предполагаемому развитию крупномасштабных процессов (последовательности е.с. периодов). Средние оценки успешности оперативных прогнозов температуры воздуха по территории России (для 70 станций) за последние три года составили для температуры воздуха: средняя квадратическая ошибка $RMSE = 1,94$; оправдываемость по знаку аномалии $\rho = 0,60$; коэффициент корреляции аномалий $AC = 0,46$; процент оправдавшихся прогнозов (попадание в градации ниже, около и выше нормы) $P = 81\%$; для осадков $P = 62\%$. Оценки выше, чем по каждому методу в отдельности.

На основе анализа климатических данных и прогностических разработок НИУ Росгидромета (Гидрометцентр России, ГГО им. А.И. Воейкова, ААНИИ, ДВНИГМИ) в ОДПП Гидрометцентра России с использованием эмпирических методов составляются также вероятностные прогнозы на вегетационный и отопительный периоды [2]. Представленная информация ориентирована на ее использование федеральными органами исполнительной власти для оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера, в интересах сельского хозяйства, охраны лесов от пожаров, водного транспорта, энергетики.

Гидродинамические прогнозы

ДМП с использованием ансамблей гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА), океана (МОЦО) и совместных моделей (МОЦАО) стали рутинными для мировых климатических центров, ответственных за сбор, обработку и распространение климатологической и прогностической продукции среди членов-соучредителей данных центров. В рамках деятельности Северо-Евразийского регионального климатического центра с 2009 года Гидрометцентр России начал оперативно распространять результаты ансамблевых прогнозов по климатической сети региона PA-VI. На рис. 1 представлена схема технологической линии выпуска ДМП в Гидрометцентре России/Северо-Евразийском климатическом центре. Схема месячного и сезонного прогноза в оперативном порядке эксплуатируется на базе глобальной полулагранжевой модели ПЛАВ [28, 29].

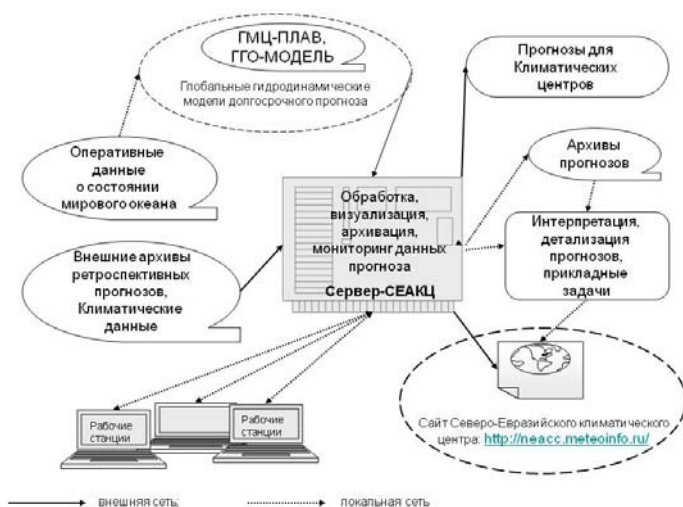


Рис. 1. Блок-схема технологической линии выпуска прогнозов на месяц и сезон в Гидрометцентре России/Северо-Евразийском климатическом центре.

Fig. 1. Bloch scheme of a monthly and seasonal forecasts technology line at the Hydrometeorological Center of Russia/North-Eurasian Climate Center.

Основными видами прогностической продукции являются глобальные поля на сетке с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ широты и долготы: геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа (H500), температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа (T850), атмосферного давления на уровне моря (MSLP), приземной температуры воздуха (TRSF), суммарных осадков (PREC). На рис. 2 в качестве примера приводятся карты пространственного распределения прогнозов на август – октябрь 2019 г. вероятностей аномалий приземной температуры воздуха и осадков, стратифицированных по трем основным градациям (ниже нормы, норма и выше нормы) с нулевой заблаговременностью. Результаты получены на базе модели ПЛАВ.

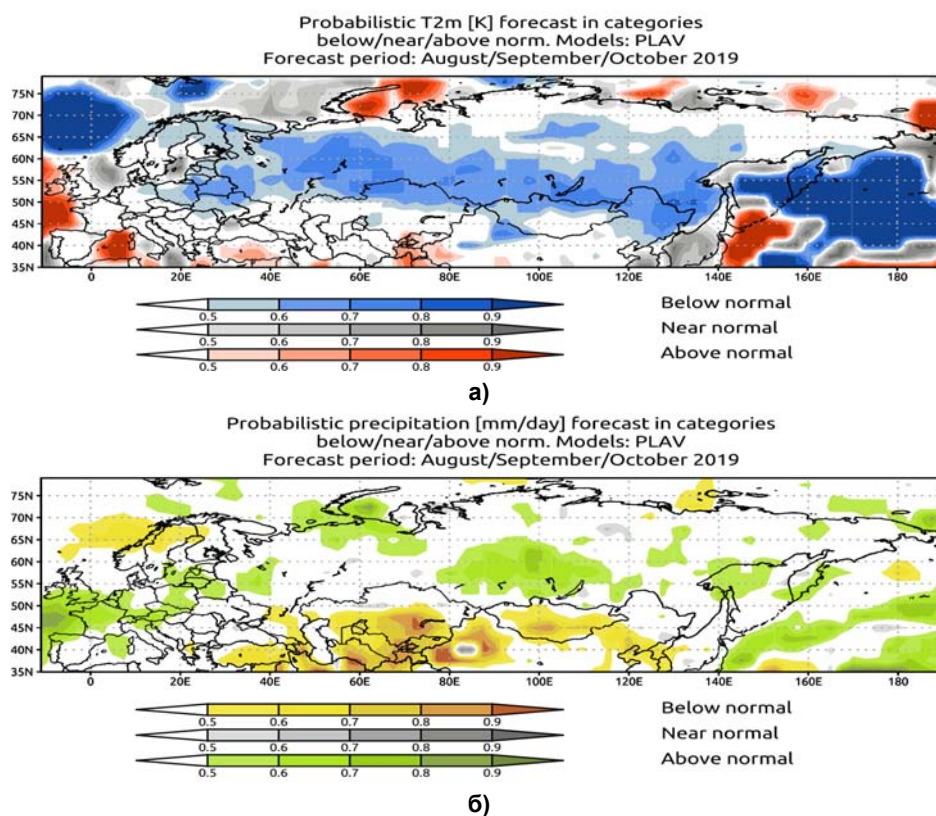


Рис. 2. Карты пространственного распределения прогнозов на август – октябрь 2019 г. вероятностей аномалий приземной температуры воздуха (а) и осадков (б), стратифицированных по трем основным градациям (ниже нормы, норма и выше нормы) с нулевой заблаговременностью. Результаты получены на базе модели ПЛАВ.

Fig. 2. Maps of the spatial distribution of forecasts of the probabilities of anomalies of surface air temperature (a) and precipitation (b) for August – October 2019, stratified by three main gradations (below normal, normal and above normal) with zero lead time. The results are based on the SL-AV model.

Подробное описание технологической линии по выпуску глобальных ансамблевых прогнозов с заблаговременностью до 4 месяцев дается в [12].

В качестве дополнительной информации с целью определения будущих режимов атмосферной циркуляции на сайте СЕАКЦ приводятся прогнозы (на месяц и сезон) восьми индексов атмосферной циркуляции, характеризующих колебания: Тихоокеанско-Североамериканское (PNA, Pacific-North American), Восточно-Атлантическое (EA, East Atlantic), Западно-Атлантическое (WA, West Atlantic), Западно-Тихоокеанское (WA, West Pacific), Евразийское (EU, Eurasian), Северо-Атлантическое (NAO, North Atlantic), Арктического (AO, Arctic Oscillation) и Полярное (POL, Polar). На основе календарей, построенных для положительной и отрицательной фаз каждого индекса, с месячным и сезонным разрешением, по данным реанализа NCEP/NCAR [36] за период с 1981 по 2010 г. построены композитные карты пространственного распределения на Северном полушарии аномалий основных метеорологических величин. На рис. 3 в качестве примера приводятся композитные карты пространственного распределения аномалий приземной температуры воздуха для положительной и отрицательной фазы индекса Восточно-Атлантического колебания.

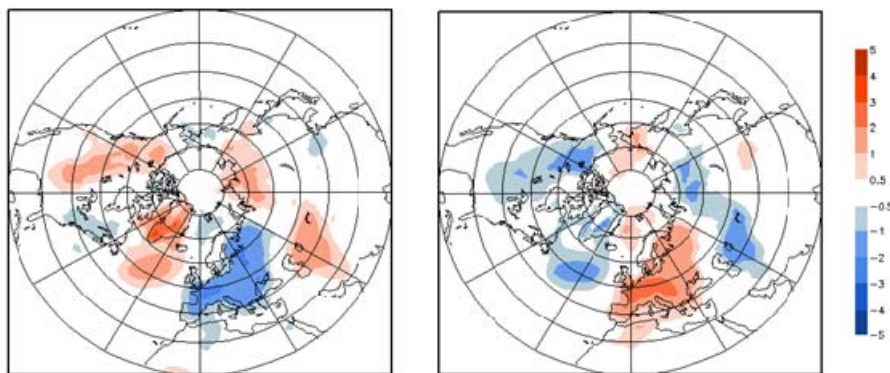


Рис. 3. Композитные карты пространственного распределения аномалий приземной температуры воздуха для положительной (слева) и отрицательной (справа) фазы индекса Восточно-Атлантического колебания.

Fig. 3. Composite maps of the spatial distribution of surface air temperature anomalies for the positive (left) and negative (right) phases of the East Atlantic Oscillation.

Полученные на основе анализа композитных карт выводы являются статистически значимыми и позволяют сформулировать некоторые климатологические приемы уточнения месячных и сезонных прогнозов. Подробное описание методики расчета и прогнозов индексов дается в [7, 16].

Дальнейшим развитием схемы можно считать разработку методов пространственной и временной детализации прогнозов на срок до сезона.

В Гидрометцентре России по аналогии со схемой сезонного прогноза реализована технология ансамблевых внутрисезонных прогнозов на срок до 46 суток с недельной временной детализацией для первого прогностического месяца [9]. Сходство технологий определяется единой вычислительной основой, которой является модель ПЛАВ. Для оперативного долгосрочного прогноза рассчитывается ансамбль из 20 прогностических реализаций по версии модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением $1,406^\circ$ по долготе, $1,125^\circ$ по широте и 28 уровнями по вертикали. При этом эволюция температуры поверхности океана и концентрации морского льда описывается с помощью наложения аномалий этих полей за некоторый период, предшествующий старту прогноза, на средние климатические ежедневные значения с постепенным затуханием аномалии концентрации морского льда в течение прогностического периода. Технология генерации ансамблей начальных данных основана на методе «выращивания» быстрорастущих возмущений [42].

В результате тесного сотрудничества проведены работы по унификации технологий внутрисезонного прогнозирования Гидрометцентра России и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО), а также проведены совместные оперативные испытания этих технологий по согласованной программе. По результатам испытаний [10], рассмотренным на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (ЦМКП) 20 июня 2017 г., было принято решение о целесообразности использования прогнозов Гидрометцентра России, ГГО и их комплекса (мультимодельных прогнозов) в качестве консультативных прогнозов в информационном обеспечении СЕАКЦ. Для территории Северо-Евразийского региона дополнительно предусмотрена пространственная детализация прогнозов приземной температуры воздуха и количества осадков по сети 70 пунктов, освещенных наблюдениями метеорологических станций. Прогнозы в пунктах составляются с использованием билинейной интерполяции и корректировки систематических ошибок по данным ретроспективных прогнозов.

С развитием и совершенствованием ДМП и расширением спектра прогностических ансамблей появляются реальные возможности не только для повышения качества прогнозов осредненных за тот или иной интервал времени (месяц, сезон) аномалий метеорологических величин и/или вероятностей их категорий, но и для выпуска прогнозов экстремальных характеристик. В рамках основной технологической линии внутрисезонных прогнозов на базе модели ПЛАВ в Гидрометцентре России в экспериментальном порядке реализована схема прогноза характеристик экстремальности (волн тепла и холода, а также среднего квадратического отклонения среднесуточной приземной температуры воздуха). В качестве показателя волн тепла (волн холода) используется модифицированный для среднесуточных данных рекомендованный ВМО индекс WSDI (CSDI)

[40], характеризующий число дней на интервале интегрирования модели (46 сут), когда по меньшей мере в течение пяти последовательных дней средняя суточная температура больше (меньше) 90 (10)-й перцентили. При этом климатические характеристики рассчитываются на базе ретроспективных прогнозов (1985–2010 гг.). Подробное описание методики расчета волн тепла и холода дается в [14]. Показателем междусуточной изменчивости температуры воздуха служит среднее квадратическое отклонение, расчеты которого производятся по отношению к осредненному за 46 сут модельному климату. Прогностические карты волн тепла и холода, а также характеристик междусуточной изменчивости будут размещаться на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://neacc.meteoinfo.ru/>) и регулярно (раз в неделю) обновляться. На рис. 4 приводится пример прогностической продукции для начальной даты прогноза 2 мая 2019 года.

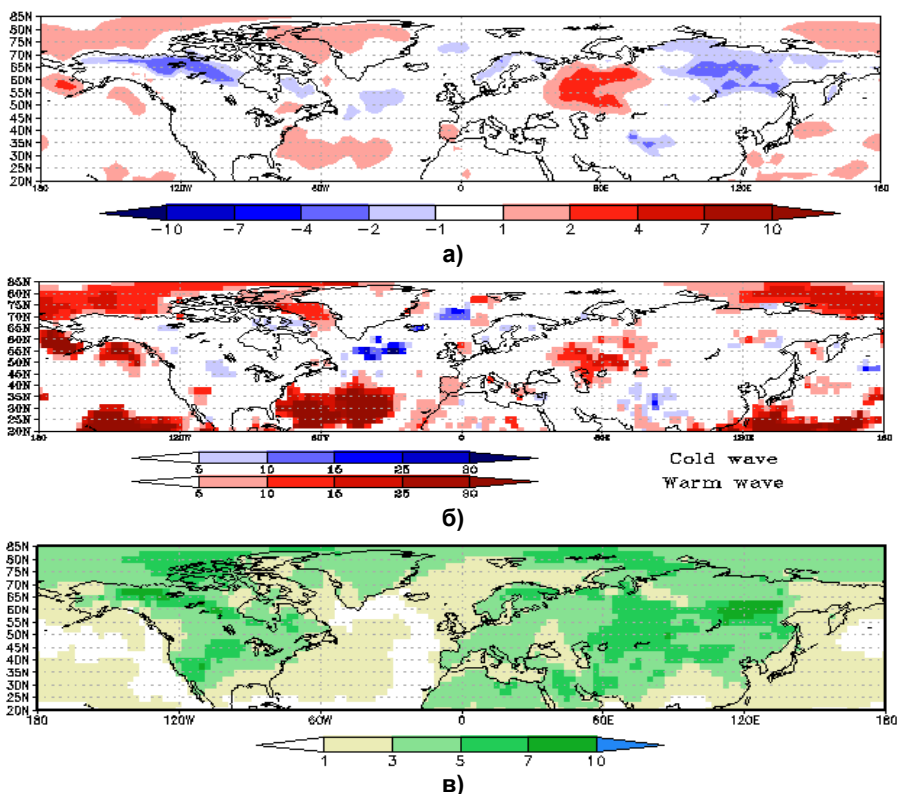


Рис. 4. Аномалии приземной температуры воздуха (для 45 сут в °С) (а), волны тепла и холода в днях (б) и среднеквадратическое отклонение температуры воздуха (для 45 сут в °С) (в), полученные на базе модели ПЛАВ для начальной даты прогноза 2 мая 2019 г.

Fig. 4. Anomaly of surface air temperature (for 45 days in °C) (a), heat and cold waves in days (б) and standard deviation of air temperature (for 45 days in °C) (в), obtained on the basis of the SL-AV model for the initial date: 2 May, 2019.

В Гидрометцентре России продолжаются исследования, направленные на улучшение качества долгосрочных прогнозов на основе развития модели ПЛАВ, а также совместной модели океана, атмосферы и морского льда, оптимизации процедур интерпретации результатов моделирования и построения мультимодельных ансамблей.

Проверка качества прогнозов

Развитие и совершенствование ДМП невозможно без их разносторонней проверки (верификации). Слово «верификация» в переводе с латинского (от лат. *verus* – истинный, *facere* – делать) означает проверку, контроль, соотнесение, подтверждение и предполагает наличие системы оценок, подтверждающих истинность теоретических положений. В Гидрометцентре России и СЕАКЦ существуют две основные ветви оценки качества прогнозов. В первом случае (верификация) даются оценки ретроспективных прогнозов, полученных на историческом материале, во втором (мониторинг) оцениваются прогнозы в реальном режиме времени. Верификация дает интегральную оценку прогностической системе за некоторый период времени, который можно считать равным периоду обновления технологии. Мониторинг качества прогнозов производится по мере поступления фактических данных с отставанием примерно в один месяц.

Для оценки прогнозов имеется множество количественных критериев, характеризующих различные свойства прогнозов. Требования к ЦПП определяют необходимость проведения верификации прогнозов в соответствии с основными положениями Стандартизированной системы оценок долгосрочных прогнозов ВМО [19, 41] и в соответствии со стратегией верификации, принятой в ведущих мировых центрах, выпускающих сезонный прогноз [38]. В Гидрометцентре России верификация прогнозов производится с учетом рекомендаций ВМО, а также собственного накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов.

В качестве основных оценок детерминистических прогнозов используются следующие показатели: коэффициент корреляции знаков ρ ; относительная ошибка прогноза Q ; средний квадрат ошибки (mean squared error) MSE; средняя квадратическая ошибка (root mean squared error) RMSE; критерий качества по среднему квадрату ошибки – мера мастерства по отношению к климатическому прогнозу (mean squared error skill score) MSSS; коэффициент корреляции аномалий (anomaly correlation coefficient) AC; показатель Хансена-Куиперса KS. Оценкой качества вероятностных прогнозов служит сравнительная оперативная характеристика ROC, подробно описанная в [20]. В качестве дополнительных оценок качества вероятностных прогнозов используются диаграммы надежности, критерий Брайера и показатель успешности вероятностного прогноза в ранжированных категориях (RPSS) [37].

В список верифицируемой прогностической продукции входят глобальные поля (на сетке с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$

широты и долготы): геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа (H500); температуры воздуха на уровне поверхности 850 гПа (T850); атмосферного давления на уровне моря (MSLP); приземной температуры воздуха (TRSF) и суммарных осадков (PREC). Прогностические поля представляются в виде отклонений от модельного климата (среднее по ансамблю), оцениваемого по данным ретроспективных прогнозов за период, по крайней мере, не менее 15 лет, а также вероятностей 3 категорий – терцилей (выше нормы, норма и ниже нормы). В качестве эталонных объектов для оценки успешности прогнозов первых четырех метеорологических величин используются данные NOAA/NCAR-DOE Reanalysis-2 [36]. Оценка качества исторических прогнозов осадков производится по данным CMAP [45]. Для оценки оперативных прогнозов осадков используются данные SAMS_OPI [35], так как данные CMAP, превосходя данные SAMS_OPI в качестве, публикуются с задержкой и не отвечают временным требованиям оперативной верификации.

Верификация исторических прогнозов проводится с применением кроссвалидации, обеспечивающей наибольшую независимость данных при коротких рядах. Для оценки статистической значимости верификационных оценок используется метод Монте-Карло в версии [8]. Верификационные оценки исторических прогнозов частично опубликованы на сайте СЕАКЦ. На рис. 5 в качестве примера приводятся карты пространственного распределения параметра ROC, рассчитанного на базе исторических прогнозов приземной температуры воздуха (модель ПЛАВ) для градаций выше и ниже нормы для периода январь–март 1981–2010 гг. Полный набор верификационных оценок исторических прогнозов модели ПЛАВ, соответствующий требованиям ВМО [23], представлен на сайте ведущего центра ВМО по мультимодельным ансамблевым долгосрочным прогнозам (<https://www.wmolc.org/>).

Мониторинг качества оперативных гидродинамических прогнозов, выпускаемых ежемесячно, проводился и проводится в режиме реального времени по ограниченному набору верификационных метрик. Таблицы оценок прогнозов, рассчитанные для пяти метеорологических величин по семи регионам (глобус, северные тропики, южные тропики, Северная Евразия, Европейская Россия, Северо-Восточная Азия, Европа), включающие агрегированные показатели ROC для трех градаций – терцилей (выше нормы, норма и ниже нормы) вероятностных прогнозов, а также коэффициенты корреляции аномалий ACC, показатели RO и средние квадратические ошибки прогнозов RMSE ежемесячно обновляются и публикуются на сайте СЕАКЦ (<http://seakc.meteoinfo.ru/verif>).

Статистическая интерпретация динамических прогнозов

Качество гидродинамических прогнозов сильно варьирует в зависимости от сезона, региона, режима атмосферной циркуляции и многих других факторов, оказывающих влияние на статистики реальной атмосферы.

В практическом плане рекомендуются использовать прогностическую информацию с большой осторожностью, выделяя географические регионы и зоны, где качество прогнозов является удовлетворительным сразу по нескольким показателям. Особое значение имеет статистическая интерпретация (СИ) результатов расчетов по модели. Примерами СИ могут служить простая статистическая калибровка, заключающаяся в устранении систематических ошибок прогнозов, статистическая регионализация (downscaling), приближение MOS (Model Output Statistics) и др. СИ может улучшить качество (т. е. создать «добавочную стоимость») только в том случае, если базовый гидродинамический прогноз является достаточно успешным. В связи с этим при проведении СИ необходимо ориентироваться на результаты верификации прогнозов.

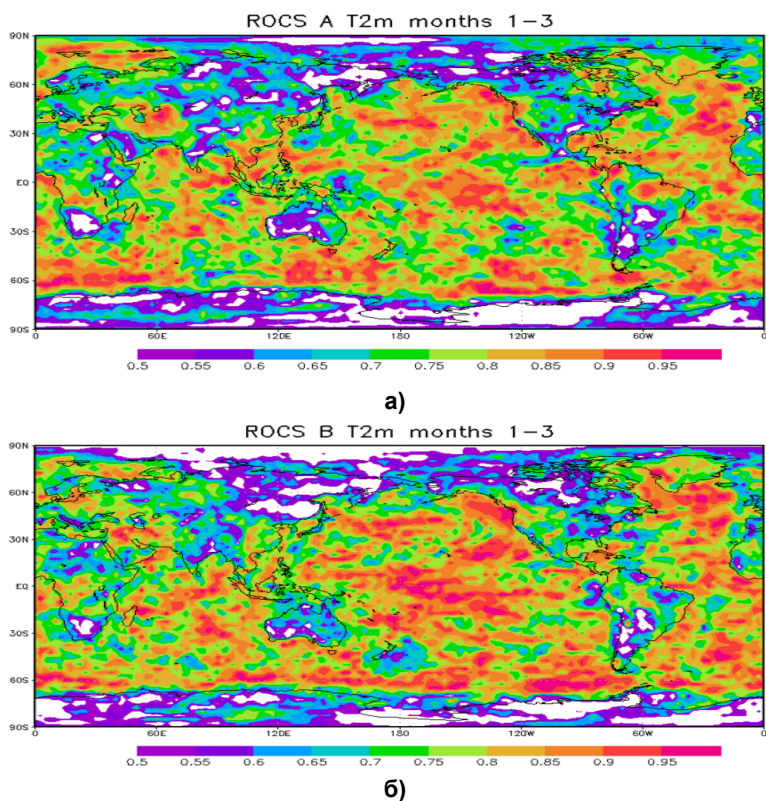


Рис. 5. Пространственное распределение параметра ROC, рассчитанного на базе исторических прогнозов приземной температуры воздуха (модель ПЛАВ) для градаций выше (а) и ниже (б) нормы для периода январь–март 1981–2010 гг.

Fig. 5. Spatial distribution of the ROC parameter calculated on the basis of historical forecasts of surface air temperature (SL-AV model) for categories: above (a) and below (b) the normal for January-March 1981-2010.

В Гидрометцентре России в рамках концепции MOS с целью повышения качества прогнозов приземной температуры и осадков реализована схема СИ гидродинамических прогнозов, полученных на базе модели ПЛАВ. В качестве исходной информации используются поля реанализа NCEP/DOE [36] и ретроспективных прогнозов полей среднесуточных и среднемесячных значений атмосферного давления на уровне моря (MSLP), геопотенциала поверхности 500 гПа (H500), температуры воздуха на поверхности 850 гПа (T850), приземной температуры воздуха (TRSF) и осадков (PREC) в регулярной географической сетке за период 1981–2010 гг. (годы расчета ретроспективных прогнозов).

В режиме кроссвалидации с использованием коэффициента корреляции аномалий АСС, значимого для 5%-ного уровня, определяется оптимальный набор предикторов. При выборе предикторов используется скользящее окно размером около 1000×1000 км. В целях сжатия исходной информации и выделения крупномасштабных составляющих выбранные предикторы представляются в виде коэффициентов разложения по естественным ортогональным составляющим. Процедура СИ применяется к прогнозам приземной температуры и месячных сумм осадков на сроки 1–4 мес по модели ПЛАВ для территории Северной Евразии (15–190° в. д., 40–80° с. ш.). Подробное изложение данной методики дается в [15, 26].

На рис. 6 приводятся карты пространственного распределения аномалий приземной температуры воздуха по данным гидродинамического моделирования, по данным реанализа и по данным гидродинамического прогноза со СИ. Как видно, использование статистических методов позволяет в отдельных регионах повысить качество прогнозов.

В таблице приведены средние оценки качества исходных и скорректированных прогнозов аномалий средней месячной температуры по модели ПЛАВ для Северной Евразии, полученные в режиме кроссвалидации для выше обозначенной выборки ретроспективных прогнозов. Как видно, с точки зрения всех показателей СИ позволяет улучшить качество динамических прогнозов.

Проводились испытания метода СИ в оперативном режиме. Оценки скорректированных оперативных прогнозов по модели ПЛАВ показали улучшение качества детерминистских прогнозов. В среднем для территории Северной Евразии и Арктики оценки скорректированных прогнозов температуры воздуха и сумм осадков выше оценок «сырых» прогнозов для большинства оперативных прогнозов, выпущенных в 2015–2018 гг.

Существенное улучшение качества прогнозов по всем показателям проявляется в переходные сезоны (для прогнозов, стартующих в марте-апреле и сентябре-ноябре). Для прогнозов, стартующих в летние и зимние месяцы, в большинстве районов качество прогнозов с использованием СИ не изменяется либо эти изменения статистически не значимы. На рис. 7 показано изменение разностей оценок прогнозов средней сезонной температуры в течение года.

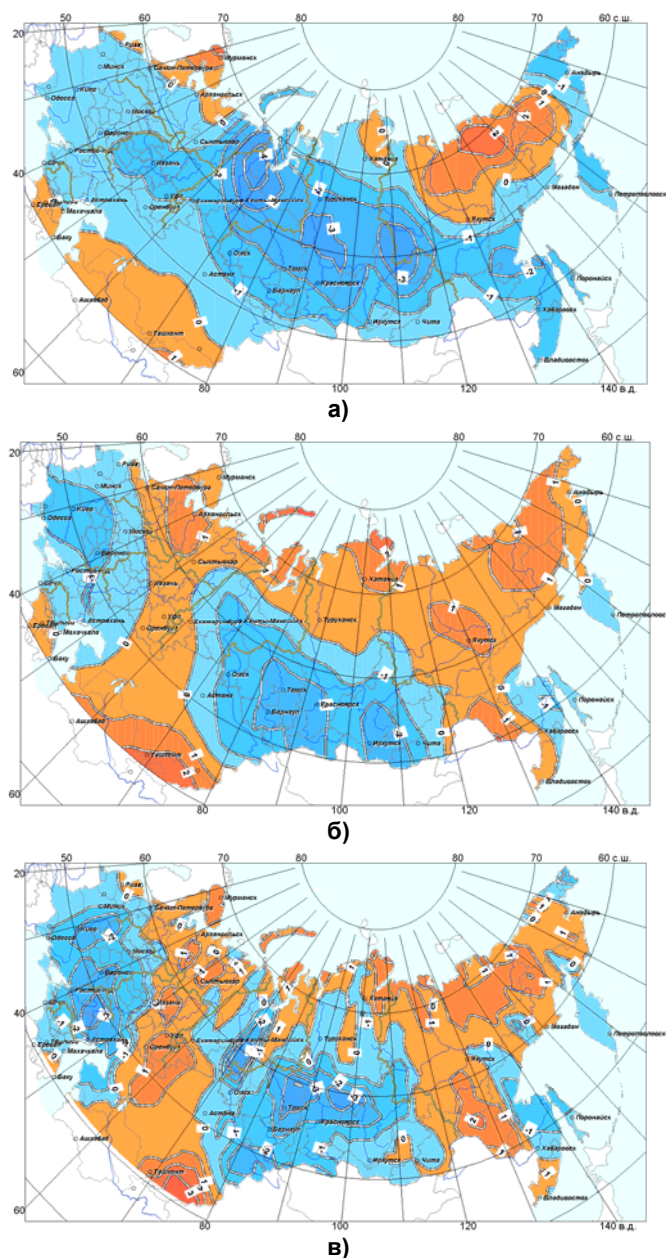


Рис. 6. Распределение аномалий приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$): по данным гидродинамического прогноза (а); реанализа (б); гидродинамического прогноза со статистической интерпретацией (в).

Fig.6. Distribution of surface air temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$): according to the hydrodynamic forecast (a); reanalysis (б); hydrodynamic forecast with statistical interpretation (в).

Таблица. Средние оценки исторических прогнозов аномалий средней месячной температуры по модели ПЛАВ (исходные и скорректированные) для Северной Евразии

Table. Average estimates of historical forecasts of mean monthly temperature anomalies according to the SL-AV model (initial and corrected) for Northern Eurasia

Оценки	Прогнозы	1 месяц	2 месяц	3 месяц
ACC	исходный	0.27	0.20	0.08
	коррекция	0.68	0.60	0.60
ρ	исходный	0.22	0.20	0.09
	коррекция	0.46	0.43	0.4
RMSE	исходный	1.97	1.45	1.25
	коррекция	1.33	1.17	0.95
RMSSS	исходный	0.05	0.09	0.03
	коррекция	0.30	0.24	0.22
KS _{scaled} *	исходный	0.58	0.58	0.50
	коррекция	0.74	0.73	0.72

Примечание. * $KS_{scaled} = \frac{KS+1}{2}$, сравнимый с площадью под кривой ROC;
 $RMSSS = 1 - \sqrt{1 - MSSS}$.

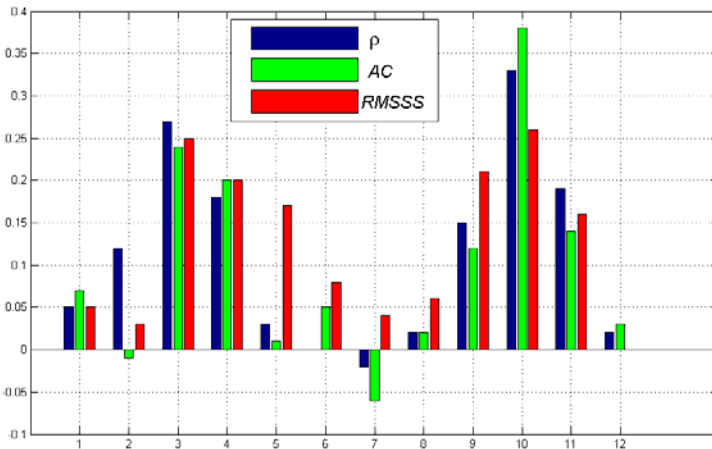


Рис. 7. Годовой ход разности оценок прогнозов с коррекцией и «сырых» прогнозов для территории Северной Евразии.

Fig. 7. The annual cycle of the difference in estimates of forecasts with correction and “raw” forecasts over Northern Eurasia.

Качество прогнозов осадков на независимом материале, несмотря на использование СИ, остается на прежнем уровне. Однако переход от точечной информации к осредненным по крупным районам суммам осадков позволяет повысить качество прогнозов. Возможности повышения качества прогнозов осадков на примере отдельных речных бассейнов продемонстрированы в [27].

Выпуск консенсусных прогнозов и взаимодействие с потребителями

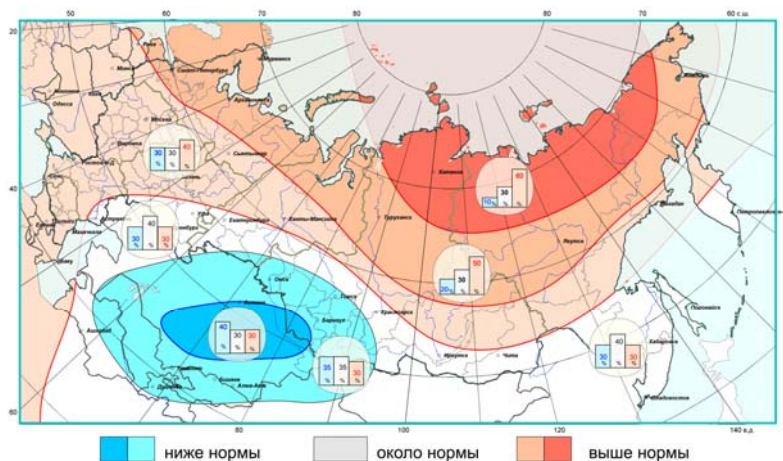
СЕАКЦ в ходе сессий Северо-Евразийских климатических форумов (СЕАКОФ) выпускает консенсусные прогнозы приземной температуры воздуха и осадков по территории Северной Евразии перед началом лета и зимы [32]. В основе процедуры составления консенсусного прогноза лежит экспертная оценка климата с учетом анализа прогнозов национальных гидрометеорологических служб стран СНГ (НГМС СНГ), РКЦ ВМО, ГЦП-ДП и других организаций по исследованию и прогнозированию климата. Более детально процесс подготовки консенсусных прогнозов и их выпуск описаны в [31]. При выработке консенсуса наряду с гидродинамическими ансамблевыми прогнозами используется также официальный вероятностный прогноз Гидрометцентра России на вегетационный и отопительный периоды.

В ходе составления консенсусного прогноза особое внимание уделяется сбору и анализу данных состояния текущих крупномасштабных (глобальных и региональных) климатических аномалий. Учитывается информация о состоянии приземного климата (температура воздуха и атмосферные осадки) за сезон и наиболее значительные климатические аномалии интересующего сезона на территории ответственности СЕАКЦ. Результирующие обобщения климатического мониторинга вырабатываются совместно Институтом глобального климата и экологии Росгидромета/РАН и Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных на основе анализа гидрометеорологических наблюдений на станциях государственных наблюдательных сетей стран СНГ. Оценки линейных трендов за последние десятилетия, характеризующие современные изменения климата на территории СНГ, дают представление о возможном влиянии долгопериодной изменчивости на общую изменчивость ожидаемых аномалий.

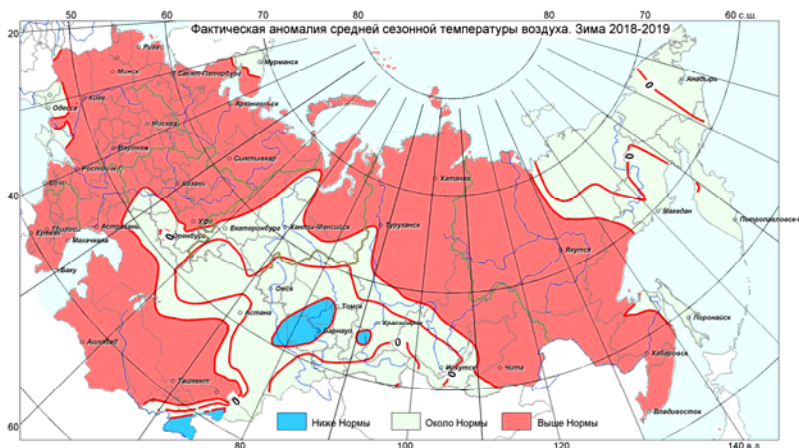
Наряду с долгопериодными составляющими климатической изменчивости рассматриваются вероятности фаз развития крупномасштабных явлений, влияющих на состояние атмосферы. Важная роль в оценках предсказуемости на месячных и сезонных интервалах времени отводится учету инерционных факторов окружающей среды: распределению температуры поверхности океана в акваториях Северного полушария, состоянию морского льда в Арктике и снежного покрова в Северной Евразии и т. д.

В качестве примера на рис. 8 приводятся карты пространственного распределения прогностических и фактических аномалий приземной температуры воздуха на зиму 2018/2019 гг. по территории Северной Евразии.

Как видно из рис. 8, консенсусный прогноз реалистично воспроизвел характерные черты пространственной структуры аномалий приземной температуры воздуха в Северной Евразии. Качество консенсусного прогноза является вполне удовлетворительным (для данного случая около 76 %).



а)



б)

Рис. 8. Карты согласованности прогнозов аномалии приземной температуры воздуха на зиму 2018/2019 гг., полученные на основе динамических и эмпирических методов (а); пространственное распределение приземной температуры воздуха на зиму 2018/2019 гг. по данным станционных наблюдений (б).

Fig. 8. Consensus forecasts of surface air temperature anomalies for winter of 2018/2019, obtained on the basis of dynamic and empirical methods (а); spatial distribution of surface air temperature for the winter of 2018/2019, according to station observations (б).

Как показала мировая практика, механизм региональных климатических форумов способствует повышению качества сезонных метеорологических прогнозов, а также их доведения до конечных пользователей. Платформа для взаимодействия в ходе климатических форумов, объединяющая широкий круг специалистов-климатологов и пользователей, заинтересованных в получении климатической информации, позволяет

экспертам профессионально обсудить формирование климатических аномалий и их потенциальное влияние на различные социально-экономические сферы. Корректное использование консенсусной прогностической продукции представителями пользовательского сектора в поддержку управления климатическими рисками может принести существенную экономическую выгоду и сократить материальные ущербы.

Заключение

За последние годы в области ДМП достигнут существенный прогресс. Его основой стало бурное развитие вычислительных и информационных технологий и тесно связанное с ними развитие гидродинамического моделирования. Достигнутая успешность (выше уровня климатического прогноза) гидродинамических месячных прогнозов позволила перейти к их использованию в оперативной практике. В настоящее время в Гидрометцентре России под руководством М.А. Толстых продолжаются активные исследования по развитию и совершенствованию системы долгосрочного гидродинамического прогнозирования, ставшие наглядным примером плодотворного сотрудничества Гидрометцентра России и Института вычислительной математики РАН. В целях улучшения качества прогнозов большое внимание уделяется повышению пространственного разрешения модели ПЛAV, улучшению представления процессов взаимодействия стратосферы и тропосферы, улучшению параметризации физических процессов подсеточного масштаба, уменьшению систематических ошибок. Особое значение имеет создание и внедрение в оперативную практику совместной модели атмосферы, океана и морского льда. Работы по унификации разных версий модели ПЛAV привели к созданию на их основе экспериментальной версии многомасштабной модели атмосферы (бесшовного прогноза). Показаны возможности использования многомасштабной версии модели не только для среднесрочного и долгосрочного прогноза, но и для моделирования климата [30].

Одним из важнейших преимуществ современных систем ДМП является использование ансамблей. Необходимость такого подхода определяется, с одной стороны, недостаточной точностью представления исходных метеорологических и океанографических полей, несовершенством гидродинамических моделей, с другой – хаотическим поведением самой атмосферы. Одним из способов устранения погрешностей, связанных с несовершенством моделей, является использование сразу нескольких моделей – мультимодельный подход, ставший стандартной практикой не только в области среднесрочных, но и долгосрочных метеорологических прогнозов. Результаты, нацеленные на задачи долгосрочного прогноза международных мультимодельных экспериментов PRO-VOST, DEMETER, DSP, SMIP-2, ENSEMBLES и др., а также многочисленные исследования [3, 15, 33, 39] свидетельствуют, что прогнозы на основе мультимодельных ансамблей обычно оказываются более успешными

по сравнению с прогнозами индивидуальных моделей. В России впервые мультимодельный подход реализован в рамках деятельности СЕАКЦ с использованием моделей общей циркуляции атмосферы ПЛАВ и модели ГГО. В перспективе предполагается расширить спектр мультимодельных ансамблей с привлечением результатов гидродинамического моделирования не только ГГО, но и других центров, например Центра климатических прогнозов США (Climate Prediction Center NOAA, CFS-2), Канадской метеослужбы (Environment and Climate Change Canada, CanCM) и Токийского климатического центра (Tokyo Climate Center, TCC).

Современные схемы ДМП, в которых используются глобальные модели атмосферы и океана, обеспечивают возможности построения мультимодельного ансамбля с размерностью порядка сотен реализаций, что позволяет расширить спектр прогностической продукции путем включения прогнозов ЭМЯ. Прогнозы экстремальных средних за период прогноза аномалий в настоящее время выпускаются, например, ЕЦСПП, Азиатско-тихоокеанским климатическим центром (APCC), Международным институтом климата и общества (IRI), Метеорологической службой Франции (Meteo-France). При этом экстремумы в средних сезонных значениях прогнозируются как вероятности попадания в верхний и нижний 15 или 20%-ные «хвосты» многолетнего распределения аномалий прогнозируемой величины. В России на сегодняшний день нет опыта долгосрочного прогноза ЭМЯ. Первыми попытками такого рода исследований можно считать реализованную в Гидрометцентре России схему прогноза экстремальных характеристик на внутрисезонных интервалах времени (волны тепла и холода, внутрисезонная дисперсия). Разработка систем раннего предупреждения об ЭМЯ на фоне глобального потепления климата является на сегодняшний день одним из приоритетов гидрометеорологии.

Возможности ДМП далеко не исчерпаны, а достигнутый уровень нельзя считать окончательным. В этом плане весьма полезными могут оказаться синоптико-статистические исследования источников долгосрочной предсказуемости атмосферы, которыми служат термическое состояние верхнего слоя океана, влажность почвы, ледяной и снежный покров суши, взаимодействие между стратосферой и тропосферой, колебание Маддена-Джулиана (МЮ), явление Эль-Ниньо и некоторые другие факторы, которые являются более инерционными, а потому и легче прогнозируемыми [11]. Какие из этих факторов определяют аномальные режимы атмосферной циркуляции? Насколько предсказуемы режимы атмосферной циркуляции в зависимости от данных факторов? Какова зависимость предсказуемости в Северной Евразии от эпизодов Эль-Ниньо/Ла-Нинья? Какие метеорологические переменные предсказуемы на сроки до сезона? Ответы на эти и многие другие вопросы могут способствовать повышению качества ДМП.

Важным аспектом является развитие взаимодействия прогнозистов и потенциальных пользователей прогностической информацией с целью

совершенствования форм представления прогнозов и их оптимального использования. Специализированное обеспечение ДМП пользователей на региональном уровне с учетом их потребностей стремительно развивается в рамках реализации международной инициативы Глобальной рамочной основы климатического обслуживания [<https://gfcs.wmo.int/>]. В этом плане важную роль играют региональные климатические форумы, которые проводятся два раза в год в рамках деятельности СЕАКЦ. Развитие существующих и появление новых механизмов взаимодействия с пользователем может принести существенную экономическую выгоду, снизить риски и уязвимость общества по отношению к катастрофическим и неблагоприятным природным явлениям.

Работа по усовершенствованию технологии долгосрочного прогнозирования на основе модели ПЛАВ выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант №17-05-01227).

Составление консенсусного прогноза на сезон выполнен при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант №17-05-41043).

Список литературы

1. Багров Н.А., Кондратович К.В., Педь Д.А., Узрюмов А.И. Долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 248 с.
2. Батырева О.В., Вильфанд Р.М., Лукиянова Л.Е. Метод сверхдолгосрочного прогноза аномалии средней месячной температуры воздуха по территории СНГ с использованием оптимальной комплексации и результаты его испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 1995. Информационный сборник № 23. С. 126-129.
3. Бундель А.Ю., Вильфанд Р.М., Крыжов В.Н., Тищенко В.А., Хан В.М. Оценка мультимодульного вероятностного прогноза на сезон на основе данных моделей АРСС // Метеорология и гидрология. 2011. № 3. С. 5-19.
4. Васильев П.П., Васильева Е.Л. Система статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей для среднесрочного прогноза погоды // 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеоиздат, 1999. С. 118-133.
5. Вильфанд Р.М., Васильев П.П., Васильева Е.Л. Развитие методов прогноза погоды на основе статистической интерпретации гидродинамических моделей по технологии Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 313-335.
6. Киктев Д.Б. Технология динамико-статистических долгосрочных метеорологических прогнозов: современное состояние и перспективы // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 118-133.
7. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть II. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 5-14.
8. Киктев Д.Б., Крыжов В.Н. О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // Метеорология и гидрология. 2004. № 11. С. 27-38.
9. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М. Выпуск детализированных метеорологических прогнозов в рамках деятельности Северо-Евразийского климатического центра // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 14-28.
10. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Зарипов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Мелешко В.П., Мирвис В.М., Львова Т.Ю., Матюгин В.А. О результатах совместных оперативных испытаний технологии детализированных по времени ансамблевых долгосрочных прогнозов на основе глобальных моделей Гидрометцентра России и ГГО им. А.И. Воейкова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1 (367) С. 116-133.
11. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Мирвис В.М. О предсказуемости экстремальных метеорологических явлений на временных масштабах до сезона // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации (сборник докладов). М., 2014. С. 54-66.

12. Киктев Д.Б., Хан В.М., Крыжов В.Н., Заринов Р.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А. Технология выпуска долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 358. С. 36-58.
13. Козельцева В.Ф., Педь Д.А., Садоков В.П. О составлении прогноза аномалии температуры воздуха на месяц с нулевой заблаговременностью // Труды Гидрометцентра СССР. 1991. Вып. 311. С. 1-14.
14. Круглова Е.Н., Куликова И.А., Тищенко В.А., Хан В.М. Прогнозирование волн тепла на внутрисезонных масштабах времени // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 1 (371). С. 95-108.
15. Крыжов В.Н. Постпроцессинг модельных долгосрочных прогнозов в Северо-Евразийском климатическом центре // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 247-253
16. Куликова И.А. Киктев Д.Б., Круглова Е.Н. Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть I. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 5-22.
17. 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.
18. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. I. Категорические прогнозы – результаты 26-летних серий испытаний // Метеорология и гидрология. 2006. № 2. С. 5-16.
19. Муравьев А.В. Стандартизированная система верификации долгосрочных метеорологических прогнозов. (SVS LRF) // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, лтд, 2010. С. 264-288.
20. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 24-34.
21. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. I. Основные конструктивные и технические характеристики динамико-статистической схемы долгосрочного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 28-36.
22. Муравьев А.В., Казначеева В.Д., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. II. Условия эксперимента и результаты прогноза // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 5-15.
23. Наставление по глобальной системе обработки данных и прогнозирования. ТОМ I. (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). Глобальные аспекты. Издание 1992 г. // ВМО-№ 485. Добавление II.8. Стандартная система проверки оправданности (ССПО) долгосрочных прогнозов (ДП). Женева, Швейцария: Секретариат ВМО, 2005. 173 с.
24. Пагава С.Т., Аристов Н.А., Блюмина Л.И., Туркетти Ж.Л. Основы синоптического метода сезонных прогнозов погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 363 с.
25. Садоков В.П. Сезонный прогноз аномалий температуры воздуха методом временных аналогов // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 22-27.
26. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Применение статистической коррекции детерминистских прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для Арктики // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 361. С. 47-65.
27. Тищенко В.А., Хан В.М., Круглова Е.Н., Куликова И.А. Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 24-39.
28. Толстых М.А. Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.; Обнинск: ФАО ФООП, 2010. 111 с.
29. 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.
30. Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: Разработка и первые результаты // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 22-35.
31. Хан В.М., Куликова И.А., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Целев В.Ю. Составление консенсусных метеорологических прогнозов на сезон в рамках СЕАКОФ на примере зимы 2017/2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 88-104.
32. Хан В.М. Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийских климатических форумов в ее реализацию // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 5-13.
33. Хан В.М., Р.М. Вильфанд, Бундель А.Ю., Крыжов В.Н., Мин Е.-М., Тищенко В.А. Мультимодельный подход при составлении прогнозов погоды на сезон // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 19-29.

34. Целев В.Ю. Специализированная информационно-вычислительная система анализа пространственно-временных рядов гидрометеорологических характеристик и ее использование в задачах разработки прогнозов погоды на месяц. / Труды научного семинара Национальной академии наук Украины и Российского фонда фундаментальных исследований «Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования», Киев, Украина, 5-7 октября 2011 г. Киев: Ника, 2012. С. 84-99.

35. Janowiak, J.E., Xie P. CAMS-OPI: A global satellite-rain gauge merged product for real-time precipitation monitoring applications // *J. Climate*. 1999. Vol. 12. P. 3335-3342.

36. 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.

37. Kryjov V.N., Kang H.-W., Nohara D., Song B.-G., Lee D.-Y., An K.-H., Sohn S.-J., Min Y.-M., Saji N.H., Tam C.Y.F. Assessment of the Climate Forecasts Produced by Individual Models and MME Methods // *APCC Technical Report No.1*. 2006. Vol. 1. 534 p.

38. Min Y.-M., Kryjov V.N., Oh S.M., Lee H.-J. Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008–2015 // *Climate Dyn.* 2017. Vol. 49. P. 4141-4156.

39. Palmer T.N., Alessandr A., Andersen U., Cantelaube P., Davey M. Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER) // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2004. Vol. 85. P. 853-872.

40. Pepler A.S., Diaz L.B., Prodhomme C., Doblas-Reyes F.J., Kumar A. The ability of a multi-model seasonal forecasting ensemble to forecast the frequency of warm, cold and wet extremes // *Wea. Clim. Extrem.* 2015. Vol. 9. P. 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.06.005>.

41. *Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF)* // New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485), 2002, vol. I.

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

43. *Use of Climate Prediction to Manage Risks* // WMO-No.1174. 2016. 39 p.

44. Vitart F., Bonet A., Brookshaw A. et al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2017. Vol. 98, no. 1. P. 163-173.

45. Xie P., Arkin P.A. Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1997. Vol. 78. P. 2539-2558.

References

1. Bagrov N.A., Kondratovich K.V., Ped' D.A., Ugryumov A.I. Dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1985, 248 p. [in Russ.]

2. Batyreva O.V., Vil'fand R.M., Lukiyanova L.E. Metod sverhdolgosrochnogo prognoza anomalii sredney mesyachnoy temperatury vozduha po territorii SNG s ispol'zovaniem optimal'noy kompleksatsii i rezul'taty ego ispytaniya. Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyy sbornik, 1995, vol. 23, pp. 126-129 [in Russ.]

3. Bundel A.Yu., Kryzhov V.N., Young-Mi Min, Khan V.M., Vil'fand R.M., Tishchenko V.A. Assessment of probability multimodel seasonal forecast based on the APCC model data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 3, pp 145–154. DOI: 10.3103/S1068373911030010.

4. Vasil'ev P.P., Vasil'eva E.L. Sistema statisticheskoy interpretatsii vyhodnoy produktsii gidrodinamicheskikh modeley dlya srednesrochnogo prognoza pogody. *70 let Gidromettsentru Rossii*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1999, pp. 118-133 [in Russ.]

5. Vil'fand R.M., Vasil'ev P.P., Vasil'eva E.L. Razvitie metodov prognoza pogody na osnove statisticheskoy interpretatsii gidrodinamicheskikh modeley po tekhnologii Gidromettsentra Rossii. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 313-335 [in Russ.]

6. Kiktev D.B. Tekhnologiya dinamiko-statisticheskikh dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov: sovremennoe sostoyanie i perspektivy. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 118-133. [in Russ.]

7. Kiktev D.B., Kруглова Е.Н., Куликова I.A. Large-scale modes of atmospheric variability. Part I. Statistical analysis and hydrodynamic modeling. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 3, pp. 147-159. DOI: 10.3103/S1068373915030012.

8. Kiktev D.B., Kryzhov V.N. Comparison of Several Methods of Assessment of Statistical Significance of Linear Trends. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, vol. 29, no. 11, pp. 17-25.

9. Kiktev D.B., Tolstykh M.A., Zariyov R.B., Kруглова Е.Н., Куликова I.A., Tishchenko V.A., Khan V.M. Issue of detailed meteorological forecasts in North Eurasian Climate Centre (NEACC). *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 14-28 [in Russ.].

10. Kiktev D.B., Tolstykh M.A., Zariyov R.B., Kруглова Е.Н., Куликова I.A., Meleshko V.P., Mirvis V.M., Lvova T.Y., Matugin V.A. Results of joint operational testing of technology of detailed ensemble

long-range forecasts based on global models of Hydrometcenter of Russia and Voeikov Main Geophysical Observatory. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 367, no. 1, pp. 116-133 [in Russ.].

11. Kiktev D.B., Tolstykh M.A., Mirvis V.M. O predskazuemosti ekstremal'nykh meteorologicheskikh yavleniy na vremennykh masshtabakh od sezona. Ekstremal'nye pavodki v bassejne r. Amur: prichiny, prognozy, rekomendatsii (sbornik dokladov). Moscow, 2014, pp. 54-66 [in Russ.].

12. Kiktev D.B., Khan V.M., Kryzhov V.N., Zaripov R.B., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tishchenko V.A. Technology of issue of long-range forecasts in the North-Eurasian Climate Centre (NEACC). *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 358, pp. 36-58 [in Russ.].

13. Kozel'tseva V.F., Ped' D.A., Sadokov V.P. O sostavlenii prognoza anomalii temperatury vozduha na mesyats s nulevoy zablavovremennost'yu. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1991, vol. 311, pp. 1-14 [in Russ.].

14. Kruglova E.N., Kulikova I.A., Tishchenko V.A., Khan V.M. Forecasting of Heat Waves on Subseasonal Timescales. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 371, no. 1, pp. 95-108 [in Russ.].

15. Kryzhov V.N. Postprotsessing model'nykh dolgosrochnykh prognozov v Severoevraziyskom klimaticheskomo tsentre. *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 247-253 [in Russ.].

16. Kulikova I.A., Kruglova E.N., Kiktev D.B. Large-scale modes of atmospheric variability. Part II. The impact on the spatial distribution of temperature and precipitation on the territory of Northern Eurasia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 4, pp. 223-230. DOI: 10.3103/S1068373915040019.

17. Mirvis V.M., Meleshko V.P. Current Status and further development of monthly and seasonal weather prediction. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, vol. 558, pp. 3-40 [in Russ.].

18. Mirvis V.M., Meleshko V.P., Gavrilina V.M., Matyugin V.A., Lvova T.Yu. Monthly Meteorological Forecasting with the MGO Hydrodynamic-statistical Method. II. Probabilistic Forecast: Analysis and Interpretation of Ensemble Distribution, Methods, and Skill of the Forecasts. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2006, vol. 31, no. 2, pp. 1-10.

19. Murav'ev A.V. Standartizirovannaya sistema verifikatsii dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov (SVS LRF). *80 let Gidromettsentru Rossii*. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 264-288 [in Russ.].

20. Murav'ev A.V., Vilfand R.M. Standardization of Skill Scores for Medium- and Long-Term Weather Forecasts. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2000, vol. 25, no. 12, pp. 16-23.

21. Murav'ev A.V., Kaznacheeva V.D., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Long-Term Forecasting of Anomalous Synoptic. Part I: Major Construction and Technological Characteristics of a Long-Term Dynamic-Statistical Weather Forecast Scheme. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 1999, vol. 24, no. 3, pp. 18-24.

22. Murav'ev A.V., Kaznacheeva V.D., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Long-Term Forecasting of Anomalous Synoptic. Part II: Conditions of Experiment and Forecast results. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 1999, vol. 24, no. 4, pp. 1-10.

23. WMO Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I (Annex IV to WMO Technical Regulations). Global Aspects. *WMO-No. 485*, Updated in 2015, 173 p.

24. Pagava S.T., Aristov N.A., Blyumina L.L., Turketti Z.L. Osnovy sinopticheskogo metoda sezonnykh prognozov pogody. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1966, 363 p. [in Russ.].

25. Sadokov V.P. Seasonal forecasting of air temperature anomalies using the time analog method. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, no. 6, pp. 369-372. DOI: 10.3103/S1068373912060027.

26. Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Application of statistical correction to deterministic air temperature and precipitation forecasts for the Arctic region produced by SL-AV model. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 361, pp. 47-65 [in Russ.].

27. Tishchenko V.A., Khan V.M., Kruglova E.N., Kulikova I.A. Monthly and Seasonal Prediction of Precipitation and Air Temperature in the Amur River Basin. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 3, pp. 169-179. DOI: 10.3103/S1068373919030026.

28. Tolstykh M.A. Global'naya polulagranzheva model' chislenного prognoza pogody. Moscow, Obninsk: FAO FOP, 2010, 111 p. [in Russ.].

29. Tolstykh M.A., Geleyn J.F., Volodin E.M., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Kostrykin S.V., Mizyuk V.G., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Shlyayeva A.V., Ezau I.N., Yurova A.Yu. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 374-382. DOI: 10.3103/S1068373915060035.

30. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. Climate Version of the SL-AV Global Atmospheric Model: Development and Preliminary Results. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 13-22. DOI: 10.3103/S1068373919010023.

31. Khan V.M., Kulikova I.A., Tishchenko V.A., Kruglova E.N., Tsepelev V.Yu. Consensus meteorological seasonal forecasting within NEACOF activity: a case study for winter 2017/2018. *Gidrometeorologiches-*

kie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 370, no. 4, pp. 88-104 [in Russ.].

32. Khan V.M. The concept of WMO Regional Climate Outlook Forum and the contribution of North Eurasia Climate Outlook Forum to its implementation. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 366, pp. 5-13 [in Russ.].

33. Khan V.M., Kryzhov V.N., Vil'fand R.M., Tishchenko V.A., Bundel' A.Yu. Multimodel approach to seasonal prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 1, pp. 11-17. DOI: 10.3103/S106837391101002X.

34. Tsepelev V.Yu. Spetsializirovannaya informatsionno-vychislitel'naya sistema analiza prostanstvenno-vremennykh ryadov gidrometeorologicheskikh harakteristik i ee ispol'zovanie v zadachah razrabotki prognozov pogody na mesyats. Trudy nauchnogo seminaru Natsional'noy akademii nauk Ukrainy i Rossiyskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy «Problemy i dostizheniya dolgosrochnogo meteorologicheskogo prognozirovaniya», Kiev, Ukraina, 5-7 oktyabrya 2011 g. Kiev: Nika, 2012, pp. 84-99 [in Russ.].

35. Janowiak, J.E., Xie P. CAMS-OPI: A global satellite-rain gauge merged product for real-time precipitation monitoring applications. *J. Climate*, 1999, vol. 12, pp. 3335-3342.

36. 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, pp. 1631-1643.

37. Kryjov V.N., Kang H.-W., Nohara D., Song B.-G., Lee D.-Y., An K.-H., Sohn S.-J., Min Y.-M., Saji N.H., Tam C.Y.F. Assessment of the Climate Forecasts Produced by Individual Models and MME Methods. *APCC Technical Report No. 1*, 2006, vol. 1, 534 p.

38. Min Y.-M., Kryjov V.N., Oh S.M., Lee H.-J. Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008–2015. *Climate Dyn.*, 2017, vol. 49, pp. 4141-4156.

39. Palmer T.N., Alessandr A., Andersen U., Cantelaube P., Davey M. Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2004, vol. 85, pp. 853-872.

40. Pepler A.S., Diaz L.B., Prodhomme C., Doblaz-Reyes F.J., Kumar A. The ability of a multi-model seasonal forecasting ensemble to forecast the frequency of warm, cold and wet extremes. *Wea. Clim. Extrem.*, 2015, vol. 9, pp. 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.06.005>.

41. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS. *WMO-No. 485*, 2002, vol. I.

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

43. Use of Climate Prediction to Manage Risks. *WMO-No.1174*, 2016, 39 p.

44. Vitart F., Bonet A., Brookshaw A. et. al. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2017, vol. 98, no. 1, pp. 163-173.

45. Xie P., Arkin P.A. Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1997, vol. 78, pp. 2539-2558.

Поступила в редакцию 04.10.2019 г.

Received by the editor 04.10.2019.