

Научно-методические основы интерпретации численных сезонных прогнозов в Северо-Евразийском климатическом центре

*В.М. Хан**, *Д.Б. Киктев*, *В.Н. Крыжов*, *Р.М. Вильфанд*

Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации,
Россия, 123376, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1;

* адрес для переписки: *khan@mecom.ru*

Реферат. Приводится краткий обзор по развитию методологии вероятностных долгосрочных прогнозов погоды как за рубежом, так и в нашей стране. Отмечается, что благодаря широкому внедрению ансамблевого подхода в гидродинамическом прогнозировании, вероятностная интерпретация долгосрочных прогнозов получила новый импульс, начиная с конца прошлого столетия. Научные исследования в рамках упоминаемых в статье проектов РФФИ послужили научной основой для разработки методов вероятностного и детерминистского сезонных прогнозов элементов погоды для практических задач Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ). Обсуждается роль СЕАКЦ в информационной системе климатического обслуживания. Представлены примеры климатической продукции в СЕАКЦ на базе использования технологий выпуска глобальных ансамблевых прогнозов на внутри-сезонных и сезонных масштабах. Рассмотрены некоторые методы статистической интерпретации прогнозов, позволяющие повысить успешность прогнозов СЕАКЦ.

Ключевые слова. Вероятностный прогноз, неопределенность, СЕАКЦ, успешность, статистическая интерпретация.

Scientific and methodological basis of interpretation of numerical seasonal forecasts of NEACC

*V.M. Khan**, *D.B. Kiktev*, *V.N. Kryjov*, *R.M. Vilfand*

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
13, Bolshoy Predtechensky per., 123376, Moscow, Russia;

* Correspondence address: *khan@mecom.ru*

Abstract. A brief overview of the development of the methodology of probabilistic long-range weather forecasts both abroad and in Russia has been given. It is noted that due to the widespread introduction of the ensemble approach in hydrodynamic forecasting, the probabilistic interpretation of long-term forecasts has received a new enforce since the end of the last century. Scientific research within the framework of the RFBR projects mentioned in the article served as a

scientific basis for the development of methods for probabilistic and deterministic seasonal forecasts of meteorological parameters for practical tasks of the North Eurasian Climate Center (NEACC). The role of NEACC in the climate services information system is discussed. Examples of climate products in NEACC, produced using technologies for issuing global ensemble forecasts on sub-seasonal and seasonal scales, are presented. Some methods of statistical interpretation of forecasts are considered, which make it possible to increase the skill scores of NEACC forecasts.

Keywords. Probabilistic forecast, uncertainty, NEACC, success, statistical interpretation.

Введение

Анализ статистической структуры полей метеорологических элементов, выполненный группой исследователей под руководством Г.В. Грузы (Груза и др., 1979), продемонстрировал, что значительная доля дисперсии этих элементов, осреднённых за большой промежуток времени, является непредсказуемой. Например, основная доля (около 80%) изменчивости нормированных зональных аномалий геопотенциала обусловлена белым шумом. Для большинства метеорологических параметров, осреднённых за месяц, максимально предсказуемая часть изменчивости составляет 30-50% (при этом эту детерминированную долю дисперсии нужно ещё научиться прогнозировать). Этот результат иллюстрирует принципиальную ограниченность возможностей детерминистских долгосрочных прогнозов метеорологических величин и/или их аномалий, не предоставляющих информацию о неопределенности прогнозов. Задача оценки и учета неопределенности успешно решается применением вероятностных прогнозов, формулируемых в терминах положения прогнозируемой функции распределения вероятностей метеорологической величины относительно ее функции распределения вероятностей из наблюдений.

Таким образом, вероятностная форма представления является естественной для прогнозов погоды. В особенности это относится к прогнозам на сроки, лежащие за пределами временного интервала детерминированной предсказуемости – к долгосрочным прогнозам.

Развитие вероятностного подхода для сезонных прогнозов

Широкое внедрение в последние годы ансамблевого подхода в гидродинамическом прогнозировании дало новый импульс вероятностной интерпретации долгосрочных прогнозов. Формирование ансамбля прогнозов возможно как с помощью одной и той же модели со слегка отличающимися начальными условиями и неизменными граничными условиями (Tracton, Kalnay, 1993; Doblus-Reyes et al., 2000; Palmer et al., 2000 и др.), так и за счет объединения детерминистских прогнозов разных моделей, отличающихся по своему математическому наполнению в описании физических процессов в атмосфере и в окружающей среде, либо посредством комплексации в одну выборку ансам-

блевых прогнозов разных моделей. При любом способе подготовки ансамбля вероятностный прогноз оказывается более информативным для принятия решений, чем детерминистский (Murphy, 1977; Krzysztofowicz, 1983; Palmer et al., 2000 и многие другие).

Последнее десятилетие XX и первое XXI века были ознаменованы проведением всевозможных вычислительных экспериментов в долгосрочном гидродинамическом прогнозировании: совместные гидродинамические модели сопоставлялись с моделями общей циркуляции атмосферы; сравнивались прогнозы мультимодельных ансамблей с результатами индивидуальных моделей; оценивалось параметрическое представление вероятностей на фоне эмпирического распределения ансамбля прогнозов, сравнивались калиброванные комбинации прогностических моделей с простыми композитами выборок прогнозов; получены важные результаты в разработке новых методов калибровки прогнозов, оценивался оптимальный размер ансамблей прогнозов; получены оценки региональной и сезонной предсказуемости и др. (Rajagopalan et al., 2002; Kharin, Zwiers, 2003; Robertson et al., 2004; Reichler, Roads, 2004; Hagedorn et al., 2005 и др.).

В нашей стране была заложена фундаментальная основа в области объективных методов вероятностных подходов прогнозирования еще задолго до широкого распространения идеологии вероятностного прогнозирования в мире. Классической монографией для нескольких поколений климатологов-прогнозистов, в которой последовательно был изложен подход представления метеорологических прогнозов в вероятностных формулировках, стала книга Г.В. Грузы и Э.Я. Раньковой «Вероятностные метеорологические прогнозы» (1983). Наряду с описанием основных методов вероятностного метеорологического прогноза в работе подробно рассматривались способы оценки качества и практического использования вероятностных прогнозов. Обсуждаемые в монографии методы субъективного вероятностного прогнозирования, основанные на экспертных оценках, имеют особую значимость и актуальность в настоящее время в связи с разработкой и широким использованием консенсусных сезонных прогнозов, выпускаемых в ходе сессий Региональных климатических форумов ВМО (например, Хан, 2015, 2017). Особого внимания заслуживает предложенный авторами метод групповых аналогов (ГРАН) с перспективным решением задачи построения статистических характеристик ансамбля состояний по степени аналогичности. Один и тот же архив наблюдений для каждого прогнозируемого процесса было предложено трансформировать в некую типовую выборку, группирующуюся вокруг текущего процесса как эталонного, что позволило выпускать прогнозы в категорической и вероятностной формах. Преимущества использования ГРАН были наглядно продемонстрированы в ходе проведения сравнительного анализа успешности двух методов аналогов сезонного прогноза температуры воздуха, разработанных в гидрометслужбе США Р. Ливзи и Т. Барнстоном и в Росгидромете – Г.В. Грузой и Э.Я. Раньковой с использованием ГРАН (Груза и др., 1993). Авторы выполнили специальный совместный эксперимент, в котором обе системы были испытаны в одинаковых условиях, с использованием одних

и тех же данных за один и тот же период. Для трёх сезонов показатели успешности прогнозов оказались близкими, а для летнего периода система ГРАН с оптимизацией предикторов по априорному качеству заметно превосходила американскую по показателю успешности (Груза и др., 1993).

При активном участии Г.В. Грузы и Э.Я. Раньковой была создана научная основа методов вероятностного и детерминистского сезонных прогнозов элементов погоды для последующего внедрения в оперативную практику в Северо-Евразийском климатическом центре (СЕАКЦ) в рамках реализации двух проектов, поддержанных Российским Фондом Фундаментальных Исследований: «Исследование возможности увеличения предела предсказуемости метеорологических величин посредством оптимальной комплексации мультимодельных ансамблевых прогнозов ведущих прогностических центров» (РФФИ 07-05-13591-офи-ц) и «Оценка статистической неоднородности климатических временных рядов по данным наблюдений и результатам физико-математического моделирования прошлого и будущего климата, с целью выявления периодов повышенной предсказуемости метеорологических процессов и крупных аномалий погоды на сезон – год – несколько лет» (РФФИ 09-05-13570-офи-ц). Для достижения основных целей этих проектов решался ряд задач, связанных с оценкой качества воспроизведения гидродинамическими моделями вероятностных и статистических характеристик макропогоды, по данным наблюдений; разработкой системы характеристик, описывающих макросиноптические процессы, и оценкой качества воспроизведения моделями и различными схемами усвоения данных их вероятностных и статистических свойств, разработкой методов оптимальной комплексации группы гидродинамических и эмпирических долгосрочных прогнозов. К моменту начала реализации проектов накопленного опыта комплексации модельных прогнозов и разработки технологий комплексации, пригодных для использования в оперативной практике в России, не было. Успешность гидродинамических сезонных прогнозов для Северной Евразии при характерных для того времени размерах ансамбля 10-20 прогностических реализаций была низкая (Крыжов, 2012). В этот период в Гидрометцентре России впервые стали внедряться подходы с использованием мультимодельного ансамбля для представления гидродинамических прогнозов в вероятностной форме. Рабочей гипотезой служило предположение, что среднее по ансамблю каждой из моделей, объединенных в мульти-модельный ансамбль, содержит полезный сигнал и некоторую погрешность, обусловленную неадекватным описанием природных процессов в модели, и если ошибки моделей независимы и нормально распределены, то среднее по ансамблю моделей содержит относительно большую долю полезной информации, нежели среднее каждой из моделей. Для проведения численных экспериментов с мультиансамблевыми прогнозами использовались ретроспективные прогнозы российских (Гидрометцентр России и Главная Геофизическая Обсерватория) и зарубежных моделей, собираемых Климатическим центром Азиатско-Тихоокеанского сотрудничества (Asia-Pacific Economic Cooperation Climate Center – APCC). Были получены результаты базового метода комплексации модельных про-

гнозов, не связанного с успешностью индивидуальных моделей. Пространственные распределения показателей качества прогнозов по отношению к фактическим, как для индивидуальных моделей, так и для результирующего прогноза, позволили оценить, насколько в количественном отношении успешность мультимодельных прогнозов превосходит прогнозы отдельных моделей. Качественно и количественно было показано (Крыжов, 2013; Киктев и др., 2015; Вильфанд и др., 2019; Хан и др., 2010; Kim et al., 2021), что успешность прогнозов, скомплексированных с использованием равных весов, выше успешности индивидуальных прогнозов. Однако, хотя мультимодельный подход несколько улучшал оценки успешности (Бундель и др., 2011; Kim et al., 2016; Min et al., 2009; Min et al., 2014; Min et al., 2017), вместе с тем отмечались потери информативности прогнозов, так как прогнозируемые вероятности стремились к климатическим (Крыжов, 2012).

Параллельно проводились вычислительные эксперименты комплексации моделей с применением формулы полной вероятности Байеса (Крыжов, 2013; Бундель и др., 2011). При формировании мультимодельных ансамблей от различных прогностических центров из разных стран, не согласующих между собой структуру прогностической информации, возникла проблема непропорциональности размеров ансамблей. Проблема комплексации прогнозов моделей с непропорциональными размерами ансамблей в ретро-прогнозах и прогнозах в реальном времени решалась с помощью специальной схемы комплексации прогнозов (Бундель и др., 2011; Min et al., 2009). Прогнозу каждой индивидуальной модели был придан вес, пропорциональный квадратному корню из размера ансамбля этой модели. Анализ оценок успешности продемонстрировал достоинства и целесообразность использования предложенного метода комплексации для вероятностных прогнозов в прогностической практике.

В качестве альтернативного метода комплексации мультимодельных прогнозов был также предложен метод «динамической климатологии», успешно сочетающий статистический прогноз с климатологией. Впервые авторами была предложена концепция «динамических норм» и «динамических аномалий» (Груза, Ранькова, 2012а), позволяющая усовершенствовать подход к определению «предиктанта» для долгосрочного прогноза температуры воздуха на месяц-сезон-год (Груза, Ранькова, 2012б). Результаты статистических экспериментов наглядно продемонстрировали, что процесс многолетних изменений «динамических аномалий» гораздо более близок к статистически стационарному процессу, чем традиционно используемые аномалии. Разработанный метод вычисления «динамических норм» в виде функции индикатора глобальных изменений климата с соответствующими оценками продемонстрировал его практическую полезность для задач прогнозирования.

Перечисленные выше результаты в рамках проектов внесли значительный вклад для дальнейшего совершенствования и внедрения методов расчета прогнозов на сезон на основе ансамбля российских и зарубежных моделей для информационного обеспечения Северо-Евразийского регионального климатического центра (Вильфанд и др., 2019; Киктев и др., 2015).

СЕАКЦ как часть международной инфраструктуры климатического обслуживания

Важная роль в информационной системе климатического обслуживания и подготовке и распространении климатической информации на региональном уровне отводится Региональным климатическим центрам (РКЦ) ВМО и Региональным климатическим форумам (РКОФ). По определению ВМО, РКЦ это передовые центры со специализацией в области разработки региональной климатической продукции (включая долгосрочные прогнозы) в поддержку региональной и национальной деятельности метеорологических служб для укрепления их потенциала. В настоящее время структура РКЦ в мире насчитывает 12 утвержденных РКЦ, 3 – в пилотной фазе и 3 – имеющих намерение начать экспериментальную фазу (рис. 1). Существует утвержденный перечень обязательных и рекомендуемых функций, которые должны выполняться РКЦ ВМО в соответствии с критериями Руководства по ГСОДП (Глобальной системе по обработке данных и систем прогнозирования). РКЦ ВМО могут формироваться как единый многофункциональный центр, либо как распределенная сеть отдельных узлов, каждый из которых выполняет некоторые из обязательных функций РКЦ.



Рисунок 1. Региональные климатические центры, работающие на регулярной основе в 2020 году
(рисунок с сайта Всемирной метеорологической организации
<https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/regional-climate-centres>)

Figure 1. Regional Climate Centers, operating on a regular basis in 2020
(figure from the website of the World Meteorological Organization
<https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/regional-climate-centres>)

Можно считать, что начало разработке концепции РКЦ было положено на 13-м Конгрессе ВМО (май 1999 г.). Участникам Конгресса было предложено сформулировать требования и задачи для региональных и глобальных цен-

тров в поддержку климатического обслуживания на национальном уровне с учетом возможности использования существующих региональных структур и институтов.

52-й Исполнительный совет ВМО (май 2000 г.) одобрил инициативу по построению инфраструктуры для задач долгосрочного прогнозирования, отметил возможность различных опций для структуры и роли РКЦ, а также важность тесного взаимодействия между различными программами ВМО при построении такой инфраструктуры. По решению 52-й Сессии Исполнительного совета ВМО, была создана Межкомиссионная целевая группа по Региональным климатическим центрам. Первый отчет группы был представлен на сессии 53-го Исполнительного совета ВМО в июне 2001 г. Участники сессии признали, что требования пользователей и функции РКЦ требуют уточнения, что деятельность РКЦ не должна дублировать работу национальных метеорологических служб и что назначение РКЦ должно следовать процедуре назначения РСМЦ. Сессия решила, что Межкомиссионная целевая группа по Региональным климатическим центрам должна продолжить свою работу. После встречи в марте 2002 года группа представила новый отчет 54-му Исполнительному совету ВМО. Отчет был одобрен и предложен к рассмотрению на 14-м Конгрессе ВМО. Конгресс (2003 г.) рекомендовал Региональным ассоциациям обсудить региональные потребности в РКЦ и требования к ним, а глобальным центрам-производителям долгосрочных прогнозов рассмотреть информационные потребности РКЦ. Также 14-м Конгрессом было предложено сформулировать соответствующий круг обязанностей РКЦ и подготовить руководство по процедурам назначения РКЦ. Такой документ был подготовлен экспертами Комиссии по климатологии в 2003 г. (WMO-TD No. 1198). К 2009 г. под руководством Комиссии по климатологии и Комиссии по основным системам были подготовлены поправки к Техническому регламенту ВМО по формальным процедурам назначения РКЦ. Первые пилотные РКЦ были назначены в 2009 г.

Оглядываясь назад на эту длинную цепочку согласований и уточнений, следует заметить, что отсчетной точкой в развитии концепции РКЦ стали базовые предложения Межкомиссионной целевой группы ВМО по Региональным климатическим центрам. С российской стороны в состав этой немногочисленной группы экспертов входил Г.В. Груза.

На постсоветском пространстве функции РКЦ ВМО возложены на Северо-Евразийский климатический центр (Киктев и др., 2015; Вильфанд и др., 2019). В рамках международных обязательств СЕАКЦ осуществляет оперативный выпуск долгосрочных прогнозов на основе результатов моделей ПЛАВ (Гидрометцентр России и ИВМ РАН) и ГГО. На сайте СЕАКЦ регулярно обновляется графическая продукция в виде карт с распределением прогностических значений основных метеозадач на месяц-сезон с нулевой и месячной заблаговременностью по территории земного шара и отдельным регионам; ежемесячные текстовые обзоры сезонных прогнозов различных метеорологических центров мира; массивы с данными вероятностных сезонных прогнозов в виде цифровых массивов на сайте СЕАКЦ; верификацион-

ные оценки оперативных и ретроспективных долгосрочных прогнозов. Регулярно осуществляется мониторинг климатических условий по территории СНГ за разные сезоны, составляется годовой бюллетень о состоянии климата и климатических аномалиях за прошедший год по территории СНГ. Наряду с выпуском оперативной продукции, в Центре ведутся научно-исследовательские работы, результаты которых внедряются в оперативную практику.

Прогностическая продукция, выпускаемая СЕАКЦ

Технология выпуска глобальных ансамблевых прогнозов в СЕАКЦ на внутрисезонных и сезонных масштабах осуществляется на базе использования полулагранжевой глобальной конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ (Толстых, 2010) и спектральной модели ГГО (Мирвис и др., 2006). Итоговой продукцией после процедуры обработки модельных данных являются детерминистические и вероятностные прогнозы метеорологических полей и их производных на внутрисезонных и сезонных интервалах времени.

Основные этапы технологической линии выпуска оперативных прогнозов включают в себя:

1. Подготовка начальных данных объективного анализа атмосферы и начальных данных объективного анализа температуры поверхности океана.

2. Расчет ретроспективных и оперативных ансамблевых прогнозов от одной даты со среднесуточной дискретностью прогностических данных на 123 суток на вычислительных ресурсах Росгидромета (суперкомпьютер CRAY).

3. Блок выбора заданных элементов прогностической модели и осреднения по заданным временным интервалам прогностических и ретроспективных ансамблей прогнозов и расчет параметров модельного климата.

4. Экспресс оценка прогнозов на наличие грубых ошибок и выбросов.

5. Расчет 3 – градаций средних за неделю и месяц аномалий (норма, выше/ниже нормы) приземной температуры воздуха (T2m), осадков (PREC), атмосферного давления, приведенного к уровню моря (MSLP), температуры на высоте поверхности 850 гПа (T850) и геопотенциала на уровне 500 гПа (H500).

6. Графическое представление прогностических аномалий средних недельных и месячных полей T850, H500, MSLP, T2m и PREC в вероятностном и детерминистском виде по выбранным географическим регионам и в глобальном масштабе.

7. Мониторинг качества и верификация оперативных прогнозов в режиме ON-LINE.

8. Блок интерпретации ансамблей численной модели.

9. Прогностическая страница сайта Северо-Евразийского климатического центра [<http://neacc.meteoinfo.ru/>] содержит карты пространственного распределения прогнозов аномалий приземной температуры воздуха, осадков, атмосферного давления, температуры на высоте поверхности 850 гПа и высоты поверхности 500 гПа, а также вероятностей трех основных градаций (выше нормы, норма и ниже нормы) указанных метеорологических величин.

На рис. 2 в качестве примера представлены прогностические поля.

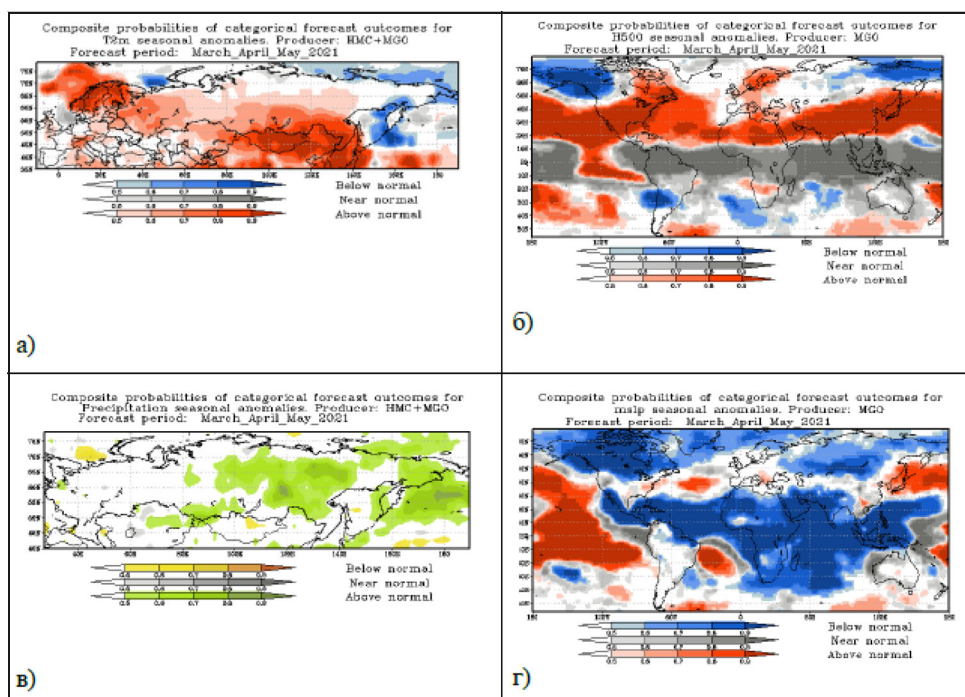


Рисунок 2. Карты прогнозов на март-май 2021 г., представленных в градациях «ниже нормы», «норма» и «выше нормы» с нулевой заблаговременностью: вероятностей аномалий приземной температуры воздуха (а); геопотенциала на уровне 500 гПа (б); осадков (в) и приземного давления (г). Результаты получены на базе моделей ПЛАВ и ГГО

Figure 2. Forecast maps for March-May 2021 presented in gradations “below normal”, “normal” and “above normal” with zero lead time: probabilities of anomalies of outcomes for surface air temperature (a); geopotential at the level of 500 hPa (б); precipitation (в) and surface pressure (г). The results were obtained on the data from the SL-AV and MGO models

Для дополнительной прогностической оценки ожидаемых режимов атмосферной циркуляции на сайте СЕАКЦ, помимо прогнозов метеорологических элементов, приводятся расчеты (на месяц и сезон) низкочастотных мод изменчивости (рис. 3) таких, как 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), Арктическое (АО – Arctic Oscillation) и Полярное (POL – Polar).

Условия формирования климатических аномалий определяются закономерностями и связями низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции. Информация об оценках значений индексов крупномасштабной циркуляции и их влияния на пространственное распределение метеорологических аномалий полезна для принятия решений прогнозисту-долгосрочнику. На сайте СЕАКЦ информация о прогнозных оценках индексов циркуляции регулярно обновляется в разделе «Крупномасштабные индексы циркуляции».

Индекс	Квартили (реанализ за 1981—2010)		Прогноз по модели Гидрометцентра России (3/2021)					
	Q1 (25%)	Q3 (75%)	Март	Апрель	Май	Июнь	Сезон 1	Сезон 2
EA	-0.493	0.485	0.96	0.05	-0.07	-0.05	0.78	-0.04
WA	-0.559	0.494	0.32	-0.3	1.45	0.38	0.46	0.51
EU	-0.452	0.458	-0.85	0.11	0.88	0.1	-0.21	0.45
WP	-0.544	0.501	-1.61	0.08	0.55	0.22	-1.09	0.33
PNA	-0.386	0.404	-0.99	-0.2	0.08	0.4	-0.69	0.03
NAO	-0.487	0.632	-0.31	0.15	0.08	0.2	-0.13	0.27
POL	-0.499	0.562	-0.11	-0.35	0.3	0.41	-0.1	0.03
AOS	-0.884	0.870	0.57	0.01	-0.01	0.01	0.19	0

Примечание. Латрно-голубой цвет в прогнозе — статистически значимые отрицательные индексы, розовый — статистически значимые положительные.

Рисунок 3. Прогностические значения индексов циркуляции на весенний сезон 2021. Значения нижних и верхних квартилей индексов дополняют прогнозы климатических индексов

Обозначения аббревиатур на рисунке: 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

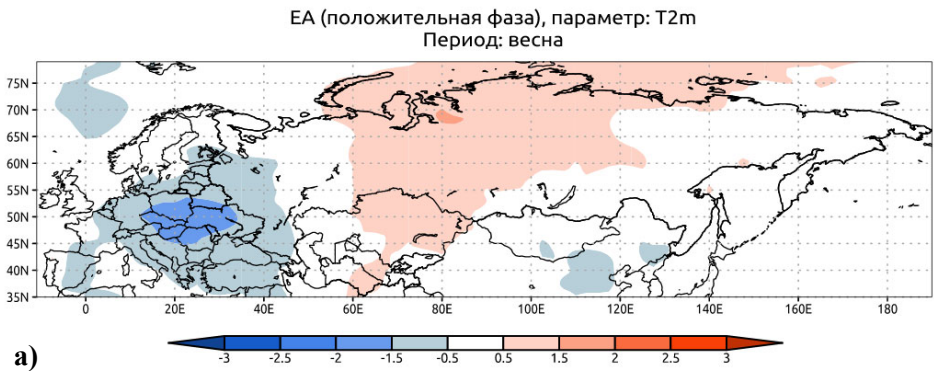
Figure 3. Indices oscillation forecasts for the spring season 2021.

The values of the lower and upper quartiles of the indices complement the forecasts of the climatic indices

Abbreviations in the figure: EA – East Atlantic, WA – West Atlantic, EU – Eurasian, WP – West Pacific, PNA – Pacific-North American, NAO – North Atlantic Oscillation, POL – Polar Oscillation, AOS – Arctic Oscillation

Для предельных значений положительной и отрицательной фаз каждого индекса с месячным и сезонным разрешением, по данным реанализа NCEP/NCAR за период с 1981 по 2010 гг., построены композитные карты пространственного распределения на Северном полушарии аномалий основных метеорологических величин. На рис. 4. в качестве примера приводятся композитные карты пространственного распределения аномалий приземной температуры воздуха для положительной (а) и отрицательной (б) фазы индекса Восточно-атлантического колебания (EA) в весенний период.

Композитные распределения аномалий построены для приземной температуры воздуха и осадков для положительных и отрицательных фаз всех перечисленных выше индексов. Цветом закрашены регионы, в которых аномалии статистически значимые. Эта информация позволяет уточнить месячные и сезонные прогнозы. Подробное описание методики расчета и прогнозов индексов дается в работах (Киктев и др., 2015).



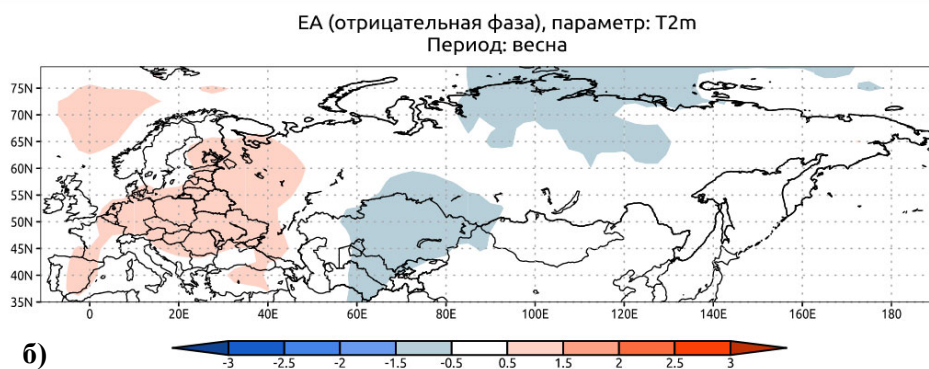


Рисунок 4. Композитные карты пространственного распределения аномалий приземной температуры воздуха для положительной (а) и отрицательной (б) фазы индекса Восточно-атлантического колебания (EA)

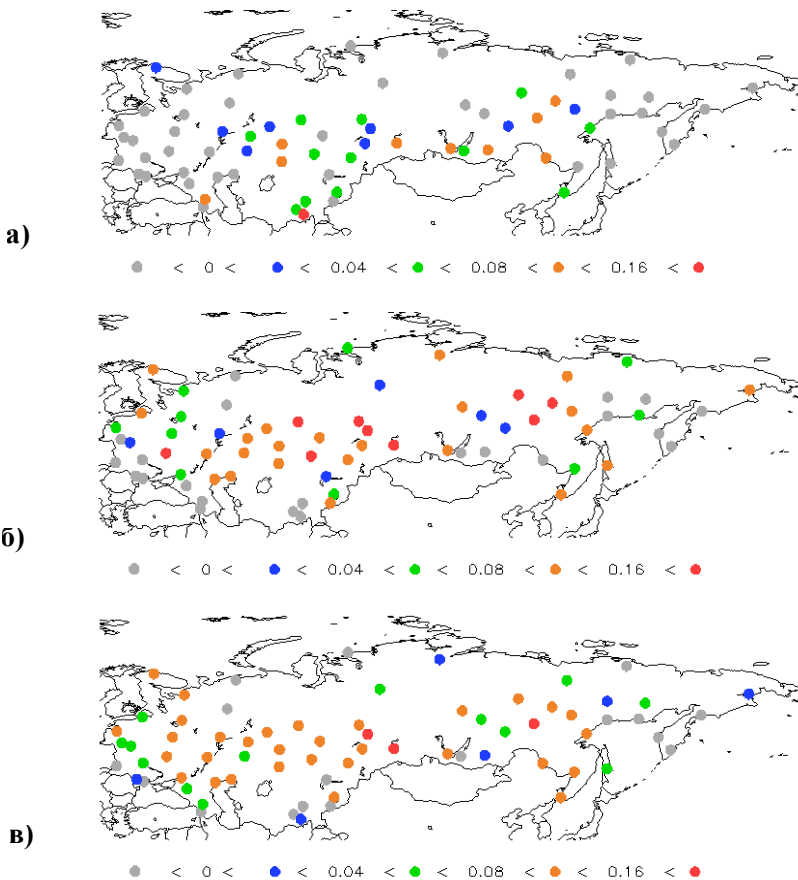
Figure 4. Composite maps of spatial distribution of surface air temperature anomalies for positive (a) and negative (b) phases of the East Atlantic Oscillation (EA) index

Статистическая интерпретация прогнозов как способ повышения успешности прогнозов

В СЕАКЦ с целью повышения качества прогнозов приземной температуры воздуха и осадков разрабатывались различные методы статистической интерпретации к выходным прогнозам по модели ПЛАВ. Одним из таких примеров явился метод вероятностной интерпретации результатов – даунскейлинг из мультимодельного прогноза на основе регрессии с учетом погрешности регрессии и разбросов ансамблевых прогнозов индивидуальных моделей (Min et al., 2011). Метод разрабатывался в ходе совместных исследований Гидрометцентра России и Климатического центра АРЭС (ARCC). Его отличительной особенностью было повышение устойчивости отбора предикторов за счет внутренней кроссвалидации схемы отбора. Моно-модельная версия адаптирована для даунскейлинга из глобальных прогнозов модели ПЛАВ на станции Северной Евразии (Крыжов, 2012, 2013). На рис. 5 показаны оценки успешности вероятностных прогнозов на станциях Северной Евразии с применением интерполяции глобальных прогнозов модели ПЛАВ и с применением методов даунскейлинга из прогнозов модели ПЛАВ. Предложенный метод даунскейлинга с вероятностной интерпретацией (рис. 5б) заметно превосходит статистическую интерполяцию (рис. 5а) – число станций с RPSS (rank probability skill score – оценка мастерства прогноза по отношению к климатическому прогнозу), значимом на 5% уровне, увеличилось с 11 до 32, а среднее значение RPSS увеличилось с -0.045 до +0.030, причем для станций Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (ЗС) – с -0.062 до +0.096. В дальнейшем, на основе опробованной схемы отбора предикторов, был разработан метод вероятностного даунскейлинга с применением формулы Байеса (Крыжов, 2013). Однако оценки успешности этого метода (рис. 5в) незначительно превысили оценки метода на основе регрессии.

Высокая результативность предложенного даунскейлинга подтверждается не только в применении для территории Северной Евразии, но и для других регионов. Метод внедрен в 2020 г. в оперативную практику в ICPAC (Intergovernmental Authority on Development Climate Prediction and Application Centre, Ngong, Kenya) для регионального прогнозирования в Восточной Африке.

Другая реализация предложенного подхода в приложениях для Северной Евразии состоит в отборе предикторов по индексу Арктической Осцилляции (АО) (Kryjov, Min, 2016). Территория Северной Евразии в зимний период в значительной степени находится под воздействием аномалий циркуляции, связанных с Арктической Осцилляцией, доминантной моды изменчивости атмосферы над зимним Северным полушарием, причем на временных масштабах от месяца-сезона до десятилетий (Thompson, Wallace, 2000; Крыжов, Горелиц, 2015). Оценки успешности (рис. 5г) сравнимы с предыдущими методами даунскейлинга – число станций с RPSS, значимом на 5% уровне, равно 29, среднее значение RPSS +0.051 (+0.088 для станций ЕТР и ЗС), но при этом отмечается смещение области повышенной успешности прогнозов к северу – в области, наиболее подверженные влиянию АО.



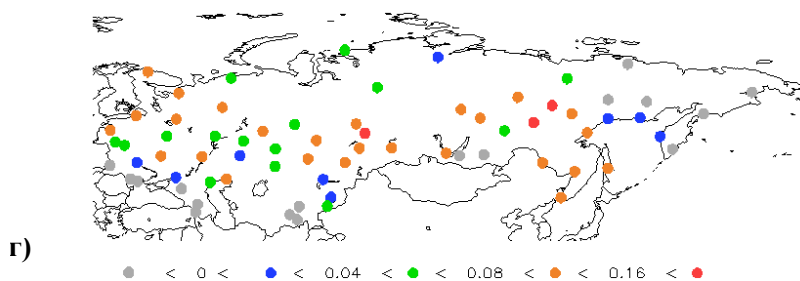


Рисунок 5. RPSS исторических прогнозов средней зимней температуры воздуха на станциях с использованием (а) интерполяции на станции из модельного прогноза в узлах сетки; (б) региональной детализации на основе регрессии; (в) теоремы Байеса; (г) теоремы Байеса с отбором предикторов по индексу АО

Figure 5. RPSS of historical forecasts of mean winter air temperature at stations using (a) station interpolation from the model forecast at grid points; (b) regional granularity based on regression; (c) Bayes' theorem; (d) Bayes' theorem with the selection of predictors by the AO index

Приведенные оценки показывают, что для Северной Евразии прогнозы, полученные с применением технологий даунскейлинга из глобальных модельных прогнозов, успешнее климатических, а интерполированные – менее успешны, чем климатические. Постобработка сезонных модельных прогнозов модели ПЛАВ с применением технологий даунскейлинга выводит успешность прогнозов средней сезонной зимней температуры на станциях большей части Северной Евразии на тот уровень, который делает целесообразным практическое применение этих прогнозов.

В рамках концепции MOS (Model Output Statistics) в СЕАКЦ также реализована альтернативная схема уточнения прогнозов приземной температуры воздуха и осадков на базе оперативных и ретроспективных прогнозов полей среднесуточных и среднемесячных значений атмосферного давления на уровне моря, геопотенциала поверхности 500 гПа, температуры воздуха на поверхности 850 гПа по модели ПЛАВ. Оптимальный набор предикторов формируется автоматически в режиме кроссвалидации с использованием корреляционной функции в скользящем окне. Поля предикторов предварительно представляются в виде коэффициентов разложения по естественным ортогональным составляющим. Процедура статистической интерпретации применяется к прогнозам приземной температуры и месячных сумм осадков на сроки 1-4 месяца по модели ПЛАВ для территории Северной Евразии и Арктики. Подробное изложение данной методики дается в работах (Тищенко и др., 2015, 2019). Проводились испытания данного метода на независимых оперативных данных 2015-2020 гг. Оценки скорректированных прогнозов продемонстрировали улучшение качества исходных детерминистских прогнозов. Причем значимое улучшение качества прогнозов по всем показателям проявляется в переходные сезоны (для прогнозов, стартующих в марте-апреле и сентябре-ноябре). На рис. 6 показано изменение разностей оценок прогнозов (ρ – оценка знака аномалий, AC – пространственный коэффициент корреляции, $RMSSS$ – среднеквадратическая мера мастерства) средней сезонной температуры в течение года.

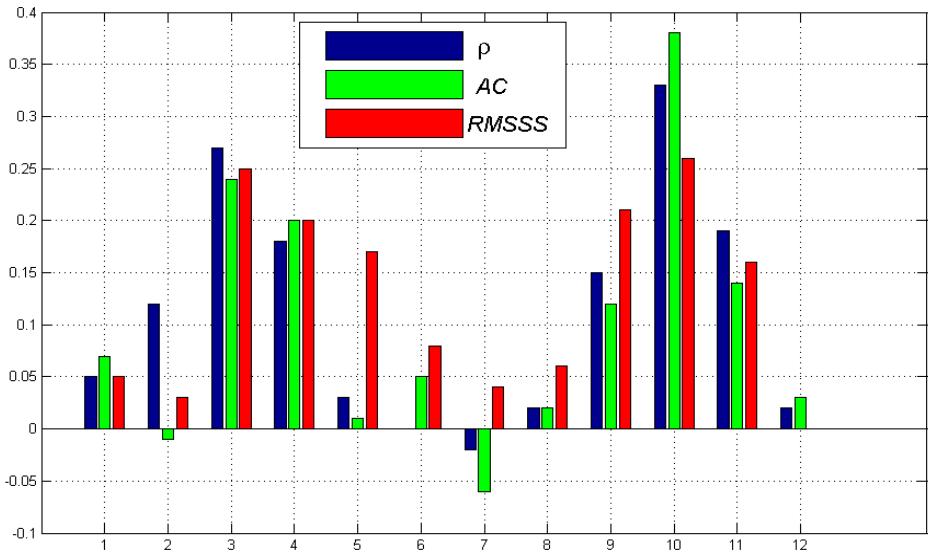


Рисунок 6. Годовой ход разности оценок прогнозов с коррекцией и исходных прогнозов по модели ПЛИАВ для территории Северной Евразии

Figure 6. Annual variation of the difference between the estimates of the corrected forecasts and the initial forecasts according to the SL-AV model for the territory of Northern Eurasia

Значительная часть вопросов потребителей связана с долгосрочными прогнозами различного рода экстремальных погодно-климатических явлений, которые являются угрозой для населения и экономики. Можно ли говорить о такого рода ранних предупреждениях при нынешнем отрезвляющем уровне успешности сезонных прогнозов? Сегодня объектом долгосрочного прогнозирования обычно являются средние за период (месяц, сезон) аномалии метеорологических полей. При достаточно большом количестве категорий крайние из них можно трактовать как «экстремальные». Долгосрочные прогнозы экстремальных средних за период прогноза аномалий сегодня уже выпускаются рядом прогностических центров. При этом экстремумы в средних сезонных значениях температуры и осадков прогнозируются как вероятности попадания в верхний и нижний 15-процентные «хвосты» многолетнего эмпирического распределения аномалий прогнозируемого элемента.

Помимо экстремумов как крайних категорий средних за период прогноза аномалий возможно также рассмотрение экстремумов другого рода – экстремумов на фоне внутрисезонной/внутримесячной изменчивости. Например, внутрисезонное количество превышений определенного порогового уровня и продолжительность периодов такого превышения значениями метеорологического параметра, число накопленных градусо-дней, количество тропических циклонов, сроки начала муссона и другие статистики от рядов ежесуточных прогностических данных также могут интерпретироваться как характеристики (индексы) экстремальности гидрометеорологических процессов. При этом предполагается, что влияние медленных внешних воздействий на атмосферу должно проявляться и в статистических характеристиках экстремальных

явлений внутри периода долгосрочного прогноза за пределами интервала предсказуемости индивидуальных синоптических структур наряду с сохраняющимися элементами памяти начального состояния совместной системы «атмосфера-океан-суша-лед». Можно ожидать, что на временных масштабах до сезона различные характеристики экстремальности метеорологических полей и явлений могут существенно отличаться по степени предсказуемости. Поисковые исследования по идентификации экстремальных гидрометеорологических характеристик и явлений, предсказуемых на внутрисезонных временных масштабах, также входят в круг научных задач, решаемых специалистами СЕАКЦ (Киктев и др., 2015, 2020).

Мониторинг успешности оперативных долгосрочных прогнозов

Мониторинг качества прогнозов в реальном времени осуществляется как часть технологической линии выпусков глобальных долгосрочных метеорологических прогнозов, развернутой и отлаженной на специализированном сервере в ФГБУ «Гидрометцентр России», по мере поступления фактических данных с отставанием примерно в один месяц. Количественные оценки качества прогнозов строятся с учетом рекомендаций ВМО (см., например, Standardized Verification System (SVS), 2002), а также накопленного опыта по составлению долгосрочных прогнозов в Гидрометцентре России.

В качестве основных оценок детерминистических прогнозов используются следующие показатели: коэффициент корреляции знаков; 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 (см., например, Standardized Verification System (SVS), 2002). В список верифицируемой прогностической продукции входят глобальные поля (на сетке с пространственным разрешением 2.5×2.5 градуса широты и долготы): геопотенциала на 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 данных для оценки успешности прогнозов первых четырех метеорологических величин используются данные NOAA NCEP-DOE Reanalysis-2 (Kanamitsu et al., 2002). Оценка качества исторических прогнозов осадков производится по данным CMAP (Xie, Arkin, 1997). Для оценки оперативных прогнозов осадков используются данные CAMS_OPI (Janowiak, Xie, 1999).

Верификация исторических прогнозов проводится с применением кросс-валидации, обеспечивающей наибольшую независимость данных при коротких рядах.

Таблицы оценок прогнозов, рассчитанные 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://seacc.meteoinfo.ru/verif>).

На рис. 7 представлен скриншот с веб-страницы СЕАКЦ с информацией об оценках успешности оперативных прогнозов. Регион, период прогноза и интересующий метеоэлемент задаются пользователями в интерактивном режиме. Графическое распределение прогностических и фактических аномалий позволяет провести качественный анализ успешности прогноза.

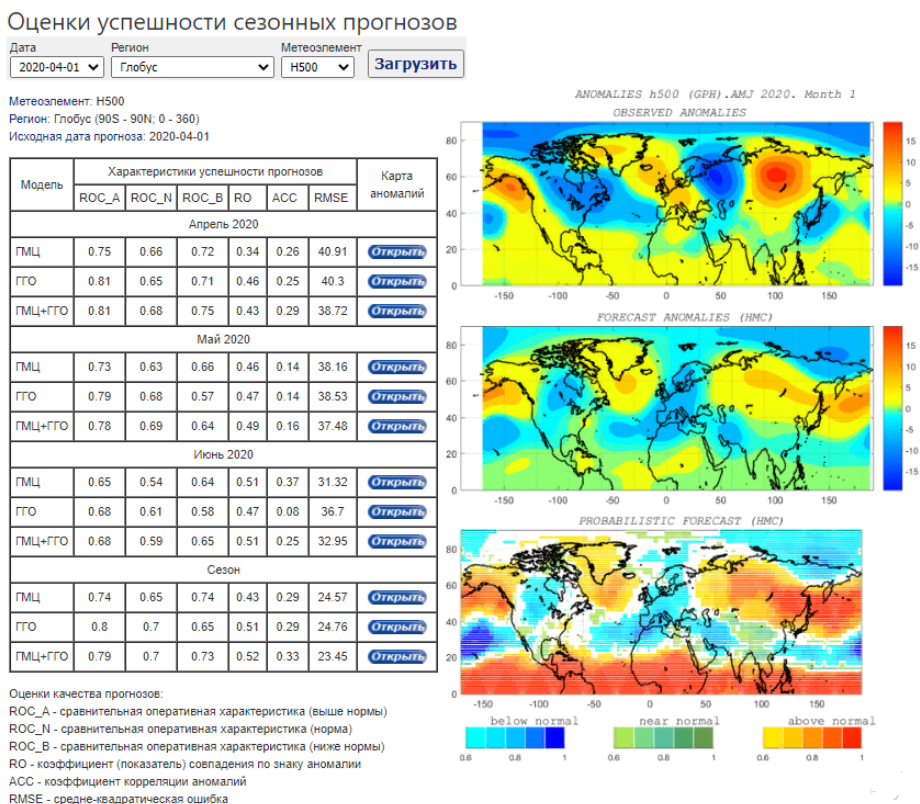


Рисунок 7. Скриншот с веб-страницы СЕАКЦ с информацией об оценках успешности оперативных прогнозов

Figure 7. Screenshot from the NEACC web-page with information on estimates of the success of operational forecasts

Как правило, для первого прогностического месяца качество прогнозов, за исключением прогнозов осадков, а также прогнозов приземной температуры воздуха в Арктике, выше климатического. Наиболее заметные преимущества

с точки зрения параметра RMSSS (т.е. по отношению к климату), отмечаются для прогнозов полей H-500, характеризующих особенности атмосферной циркуляции в средней тропосфере. Наименьшими преимуществами по сравнению с климатическими обладают «агрегированные» показатели, ограниченные полярными широтами. Данное обстоятельство указывает на то, что в арктических широтах процессы взаимодействия атмосферы, океана и криосферы носят сложный характер, что указывает на необходимость в развитии и использовании в прогностической практике совместных моделей атмосферы и океана, учитывающих состояние ледового покрова и других компонентов криосферы. Использование вероятностных прогнозов и ансамблевых прогностических систем позволяет расширить предел предсказуемости. Полезные сигналы для отдельных градаций прослеживаются на более длительных периодах времени. Так, например, прогнозы градаций «ниже нормы» и «выше нормы» температуры и геопотенциала H-500 для территории Северной Евразии и всего Северного полушария на интервале за пределами месяца оказываются выше уровня случайного. Полученные выводы уточняются и обобщаются в процессе регулярного мониторинга качества долгосрочных прогнозов.

Выводы

Методология вероятностного подхода к задачам прогнозирования, инициатором которого в нашей стране был Г.В. Груза, продолжает развиваться. В процессе создания технологической линии выпуска сезонных прогнозов СЕАКЦ были разработаны базовые методы для оптимальной комплексации глобальных модельных долгосрочных прогнозов. Результаты разработок по вероятностной интерпретации даунскейлинга глобальных ансамблевых численных долгосрочных прогнозов сегодня внедрены в прогностические технологии как СЕАКЦ, так и ряда зарубежных прогностических центров. Ведется работа по идентификации «окон» расширенной предсказуемости и их связи с крупномасштабными модами атмосферной изменчивости. Наряду с прогнозированием отдельных метеозлементов анализируется способность моделей к воспроизведению крупномасштабных синоптических процессов, в особенности тех, которые формируют значительные климатические аномалии. Расширяется круг приложений методологии вероятностного прогнозирования. Так, в рамках идеологии «бесшовного прогнозирования» объектом повышенного интереса в последние годы стали разработки в сфере прогнозирования внутрисезонной изменчивости и, прежде всего, различного рода экстремальных погодно-климатических явлений.

Для успешного развития задач долгосрочного прогнозирования критически важно использование современных совместных моделей атмосферы, океана и морского льда. К сожалению, в России до настоящего момента не существует оперативно действующей совместной модели океана-атмосферы для прогностических целей, что делает заметным отрыв Глобального центра по подготовке сезонных прогнозов (ГПЦ) России от ведущих прогностических центров в развитых странах. В рамках задач ГПЦ и СЕАКЦ совместная

модель разрабатывается объединенными усилиями Гидрометцентра России и ИВМ РАН, в которой атмосферным компонентом является глобальная модель атмосферы ПЛАВ, а океанским – модель NEMO. Предпринимаются усилия по совершенствованию оперативной версии модели ПЛАВ, как, например, в части воспроизведения процессов глубокой конвекции во внутритропической зоне конвергенции и связанных с ней осадков; в настройках модели многослойной почвы; в блоках описания процессов на поверхности и в растительности, а также в других компонентах модели. Параллельно исследования в ГГО, связанные с задачами СЕАКЦ, направлены на усовершенствование системы сезонного гидродинамического прогнозирования и приносят заметные результаты в реализации новых схем параметризации физических процессов, а также в разработке совместной модели океан-атмосфера на базе спектральной модели ГГО и модели океана ИВМ РАН.

Практика прогнозирования на сезонных масштабах времени является естественным полигоном для совершенствования климатических моделей и методов статистической интерпретации. В задачах прогнозирования климатической изменчивости важно учитывать долгопериодные изменения климатической системы, связанные как с изменениями внутренней динамики и взаимодействием ее компонентов, так и с внешними воздействиями антропогенного (землепользование, эмиссия парниковых газов и прочее) и естественного (активность извержения вулканов, изменение астрономических параметров земной системы, модуляции солнечной радиации) происхождений. Создание надежной научно-практической основы для сезонных прогнозов имеет большое значение само по себе и способствует наращиванию потенциала в развитии систем климатического прогнозирования на межгодовых и междекадных временных масштабах.

Работа выполнена при финансовой поддержке МинобрНауки РФ (соглашение №075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

Список литературы

Бундель, А.Ю., Вильфанд, Р.М., Крыжов, В.Н., Тищенко, В.А., Хан, В.М. (2011) Оценка мультимодульного вероятностного прогноза на сезон на основе данных моделей АРСС, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 5-19.

Вильфанд, Р.М., Зарипов, Р.Б., Киктев, Д.Б., Круглова, Е.Н., Крыжов, В.Н., Куликова, И.А., Тищенко, В.А., Толстых, М.А., Хан, В.М. (2019) Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, № 4 (374), с. 12-36.

Груза, Г.В., Поляк, И.И., Шахмейстер, В.А. (1979) О пространственно-временной статистической структуре среднего месячного геопотенциала 500 мб, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 35-43.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Ливзи, Р., Баристон, Т. (1993) Сравнительный анализ успешности двух методов сезонного прогноза температуры воздуха с использованием аналогов, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 11-21.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1983) *Вероятностные метеорологические прогнозы*, Л., Гидрометеиздат, 271 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (2012а) *Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России температура воздуха*, Обнинск, ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД, 196 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (2012б) Динамические климатические нормы температуры воздуха, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-18.

Киктев, Д.Б., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А. (2020) Об оценке индекса экстремальности EFI, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 5-22.

Киктев, Д.Б., Хан, В.М., Крыжов, В.Н., Зарипов, Р.Б., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А., Тищенко, В.А. (2015) Технология выпуска региональных долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ), *Труды Гидрометцентра России*, вып. 358, с. 36-58.

Крыжов, В.Н. (2012) Региональная коррекция для Северной Евразии глобальных сезонных прогнозов Гидрометцентра России, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 5-14.

Крыжов, В.Н. (2013) *Вероятностный сезонный прогноз температуры воздуха на основе статистических связей метеорологических величин*, диссертация доктора географических наук, Москва, 297 с.

Крыжов, В.Н., Горелиц, О.В. (2015) Арктическая осцилляция и ее влияние на температуру и осадки Северной Евразии в XX веке, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 5-19.

Мирвис, В.М., Мелешко, В.П., Гаврилина, В.М., Матюгин, В.А., Львова, Т.Ю. (2006) Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. II. Вероятностный прогноз: анализ и интерпретация распределения ансамбля, методика и качество прогнозов, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 5-16.

Тищенко, В.А., Хан, В.М., Толстых, М.А., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А., Гельфан, А.Н. (2015) Применение статистической коррекции для детерминистских месячных и сезонных прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 358, с. 121-132.

Тищенко, В.А., Хан, В.М., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А. (2019) Прогнозирование осадков и температуры в бассейне реки Амур на месячных и сезонных интервалах времени, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 24-39.

Толстых, М.А. (2010) *Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды*, Обнинск, ФАО ФОП, 111 с.

Хан, В.М. (2015) Деятельность Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) и Северо-Евразийского климатического форума (СЕАКОФ) в международной структуре ВМО по улучшению климатического обслуживания, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 358, с. 5-12.

Хан, В.М. (2017) Концепция региональных климатических форумов ВМО и вклад Северо-Евразийского климатического форума в ее реализацию, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 366, с. 5-13.

Хан, В.М., Вильфанд, Р.М., Бундель, А.Ю., Крыжов, В.Н., Мин, Е.М., Тищенко, В.А. (2011) Мультимодельный подход при составлении прогнозов погоды на сезон, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 19-29.

Doblas-Reyes, F.J., Déqué, M., Piedeliérem, J.-P., (2000) Multi-model spread and probabilistic seasonal forecasts in PROVOST, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, vol. 126, pp. 2069-2088.

Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F.J., Palmer, T.N. (2005) The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - I. Basic concept, *Tellus*, vol. 57A, pp. 219-233.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146 (730), pp. 1999-2049.

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

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W.I., Woollen, J., Yang, Shi-Keng, Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L. (2002) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 83, pp. 1631-1643.

Kharin, V.V., Zwiers, F.W. (2003) Improved seasonal probability forecast, *Journal of Climate*, vol. 16, pp. 1684-1701.

Kim, G., Ahn, J.-B., Kryjov, V.N., Sohn, S.-J., Yun, W.-T., Graham, R., Kolli, R. K., Kumar, A., Ceron, J.-P. (2016) Global and regional skill of the seasonal predictions by WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble, *International Journal of Climatology*, vol. 36, pp. 1657-1675, doi: 10.1002/joc.4449.

Kim, G., Ahn, J.B., Kryjov, V.N., Lee, W.S., Kim, D.J., Kumar, A. (2021) Assessment of multi-model ensemble methods for WMO LC-LRFMME, *International Journal of Climatology*, vol. 41, pp. E2462-E2481, doi: 10.1002/joc.6858.

Kryjov, V.N. (2012) Seasonal climate prediction for North Eurasia, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 015203-1 – 015203-6, doi:10.1088/1748-9326/7/1/015203.

Kryjov, V.N., Min, Y.-M. (2016) Predictability of the wintertime Arctic Oscillation based on autumn circulation, *International Journal of Climatology*, vol. 36, pp. 4181-4186, doi: 10.1002/joc.461.

Krzysztofowicz, R. (1983) Why should a forecaster and a decision maker use Bayes theorem, *Water Resour. Res.*, vol. 19, pp. 327-336.

Min, Y.-M., Kryjov, V.N., Park, C.-K. (2009) Probabilistic Multimodel Ensemble Approach to Seasonal Prediction, *Weather and Forecasting*, vol. 24, pp. 812-828.

Min, Y.-M., Kryjov, V.N., Oh, S.-M. (2014) Assessment of APCC Multi-Model Ensemble Prediction in Seasonal Climate Forecasting: Retrospective (1983-2003) and Real-time Forecasts (2008-2013), *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 119(21), pp. 12, 132-12, 150, doi:10.1002/2014JD022230.

Min, Young-Mi., Kryjov, V.N., Oh, Sang Myeong, Lee, Hyun-Ju (2017) Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008-2015, *Climate Dynamics*, vol. 49, pp. 4141-4156, doi:10.1007/s00382-017-3576-2.

Min, Y.-M., Kryjov, V.N., Oh, J.H. (2011) Probabilistic Interpretation of Regression-Based Downscaled Seasonal Ensemble Predictions with the Estimation of Uncertainty, *J. Geophys. Res.*, vol. 116, D08101-D08101-10, doi:10.1029/2010JD015284.

Murphy, A.H. (1977) The value of climatological, categorical, and probabilistic forecasts in the cost-loss ratio situation, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 105, pp. 803-816.

Palmer, T.N., Brankovic, C., Richardson, D.S. (2000) A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol. 126, pp. 2013-2034.

Rajagopalan, B., Lall, U., Zebiak, S. (2002) Categorical climate forecasts through regularization and optimal combination of multiple GCM ensembles, *Mon. Weather Rev.*, vol. 130, pp. 1792-1811.

Reichler, T., Roads, J.O. (2004) Time-Space Distribution of Long-Range Atmospheric Predictability, *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 61, pp. 249-263.

Robertson, A.W., Lall, U., Zebiak, S.E., Goddard, L. (2004) Improved combination of multiple atmospheric GCM ensembles for seasonal prediction, *Monthly Weather Review*, vol. 132, pp. 2732-2744.

Thompson, D.W.J., Wallace, J.M. (2000) Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month to month variability, *Journal of Climate*, vol. 13, pp. 1000-1016, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2).

Tracton, M.S., Kalnay, E. (1993) Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects, *Wea. Forecasting*, vol. 8, pp. 379-398.

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

Xie, P., Arkin, P.A. (1997) Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model output, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, pp. 2539-2558.

References

- Bundel', A.Yu., Vilfand, R.M., Kryzhov, V.N., Tishchenko, V.A., Khan, V.M. (2011) Ocenka mul'timodul'nogo veroyatnostnogo prognoza na sezon na osnove dannyh modelej ARSS [Assessment of Multimodel Probabilistic Seasonal Forecast Based on the APCC Model Data], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 3, pp. 5-19.
- Vilfand, R.M., Zaripov, R.B., Kiktev, D.B., Kruglova, E.N., Kryzhov, V.N., Kulikova, I.A., Tishchenko, V.A., Tolstyh, M.A., Khan, V.M. (2019) Dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy v Gidrometcentre Rossii [Long-range forecasting at Hydrometeorological Center of Russia], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, vol. 4 (374), pp. 12-36.
- Gruza, G.V., Polyak, I.I., Shahmejster, V.A. (1979) O prostranstvenno-vremennoj statisticheskoj strukture srednego mesyachnogo geopotenciala 500 mb [On the spatial-temporal statistical structure of the average monthly geopotential of 500 mb], *Russian Meteorology and hydrology*, vol. 4, pp. 35-43.
- Gruza, G.V., Rankova, E.Ya., Livzi, R., Bariston, T. (1993) Sravnitel'nyj analiz uspešnosti dvuh metodov sezonnogo prognoza temperatury ozduha s ispol'zovaniem analogov [Comparative analysis of the success of two methods of seasonal forecasting of air temperature using analogs], *Russian Meteorology and hydrology*, vol. 7, pp. 11-21.
- Gruza, G.V., Rankova, E.Ya. (1983) *Veroyatnostnye meteorologicheskie prognozy* [Probabilistic weather forecasts], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 271 p.
- Gruza, G.V., Rankova, E.Ya. (2012a) *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii temperatura vozduha* [Observed and expected climate changes air temperature in Russia], FGBU VNIIGMI-MCD, Obninsk, Russia, 196 p.
- Gruza, G.V., Rankova, E.Ya. (2012b) Dinamicheskie klimaticheskie normy temperatury vozduha [Dynamic Normals of Surface Air Temperature], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 12, pp. 5-18.
- Kiktev, D.B., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A. (2020). Ob ocenke indeksa ekstremal'nosti EFI [On the evaluation of the extremality index EFI], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 1, pp. 5-22.
- Kiktev, D.B., Khan, V.M., Kryzhov, V.N., Zaripov, R.B., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A., Tishchenko, V.A. (2015) Tekhnologiya vypuska regional'nyh dolgosrochnyh prognozov Severo-Evrazijskogo klimaticheskogo centra (SEAKC) [Technology of issue of long-range forecasts in the North-Eurasian Climate Centre (NEACC)], *Trudy Gidrometcentra Rossii*, vol. 358, pp. 36-58.
- Kryzhov, V.N. (2012). Regional'naya korrekciya dlya Severnoj Evrazii global'nyh sezonnyh prognozov Gidrometcentra Rossii [Downscaling for North Eurasia from the Global Seasonal Forecasts of Hydrometcenter of Russia], *Russian Meteorology and hydrology*, vol. 5, pp. 5-14.
-

Kryzhov, V.N. (2013). *Veroyatnostnyj sezonnyj prognoz temperatury vozduha na osnove statisticheskikh svyazey meteorologicheskikh velichin* [Probabilistic seasonal forecast of outcomes for surface air temperature based on statistical relationships of meteorological values], Doctor's thesis, Moscow, Russia, 297 p.

Kryzhov, V.N., Gorelic, O.V. (2015) *Arkticheskaya oscillyaciya i ee vliyanie na temperaturu i osadki Severnoj Evrazii v XX veke* [The Arctic Oscillation and Its Impact on Temperature and Precipitation in Northern Eurasia in the 20th Century], *Russian Meteorology and hydrology*, vol. 11, pp. 5-19.

Mirvis, V.M., Meleshko, V.P, Gavrilina, V.M., Matyugin, V.A., L'vova, T.Yu. (2006) *Prognoz meteorologicheskikh velichin na predstoyashchij mesyac gidrodinamiko-statisticheskim metodom GGO. II. Veroyatnostnyj prognoz: analiz i interpretaciya raspredeleniya ansamblya, metodika i kachestvo prognozov veke* [Monthly Meteorological Forecasting with the MGO Hydrodynamic-statistical Method. II. Probabilistic Forecast: Analysis and Interpretation of Ensemble Distribution, Methods, and Skill of the Forecasts], *Russian Meteorology and hydrology*, vol. 2, pp. 5-16.

Tishchenko, V.A., Khan, V.M., Tolstyh, M.A., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A., Gel'fan A.N. (2015) *Primenenie statisticheskoy korrekcii dlya deterministskikh mesyachnyh i sezonnyh prognozov temperatury vozduha i osadkov po modeli PLAV dlya otdel'nyh rajonov Rossii*. [Application of statistical correction for deterministic monthly and seasonal PLAV model forecasts of air temperature and precipitation for some regions of Russia], *Trudy Gidrometcentra Rossii*, vol. 358, pp. 121-132.

Tishchenko, V.A., Khan, V.M., Kruglova, E.N. Kulikova, I.A. (2019) *Prognozirovanie osadkov i temperatury v bassejne reki Amur na mesyachnyh i sezonnyh intervalah vremeni* [Monthly and Seasonal Prediction of Precipitation and Air Temperature in the Amur River Basin], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 3, pp. 24-39.

Tolstyh, M.A. (2010) *Global'naya polulagranzheva model' chislennogo prognoza pogody* [Global Semi-Lagrangian Numerical Weather Prediction Model], FAO FOP, Obninsk, Russia, 111 p.

Khan, V.M. (2015) *Deyatel'nost' Severo-Evrazijskogo klimaticheskogo centra (SEAKC) i Severo-Evrazijskogo klimaticheskogo foruma (SEAKOF) v mezhdunarodnoj strukture VMO po uluchsheniyu klimaticheskogo obsluzhivaniya* [Activity of the North-Eurasian Climate Center (NEACC) and the North Eurasian Climate Outlook Forum (NEACOF) aimed at climate services improvement within the international structure of WMO], *Trudy Gidrometcentra Rossii*, vol. 358, pp. 5-12.

Khan, V.M., Vilfand, R.M., Bundel', A.Yu., Kryzhov, V.N., Min, E.-M., Tishchenko, V.A. (2011) *Mul'timodel'nyj podhod pri sostavlenii prognozov pogody na sezon* [Multimodel Approach to Seasonal Prediction], *Russian Meteorology and hydrology*, no. 1, pp. 19-29.

Doblas-Reyes, F.J., Déqué, M., Piedeliérem, J.-P., (2000) *Multi-model spread and probabilistic seasonal forecasts in PROVOST*, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, vol. 126, pp. 2069-2088.

Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F.J., Palmer, T.N. (2005) The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - I. Basic concept, *Tellus*, vol. 57A, pp. 219-233.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146 (730), pp. 1999-2049.

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

Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W.I., Woollen, J., Yang, Shi-Keng, Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L. (2002) NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 83, pp. 1631-1643.

Kharin, V.V., Zwiers, F.W. (2003) Improved seasonal probability forecast, *Journal of Climate*, vol. 16, pp. 1684-1701.

Kim, G., Ahn, J.-B., Kryjov, V.N., Sohn, S.-J., Yun, W.-T., Graham, R., Kolli, R. K., Kumar, A., Ceron, J.-P. (2016) Global and regional skill of the seasonal predictions by WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble, *International Journal of Climatology*, vol. 36, pp. 1657-1675, doi: 10.1002/joc.4449.

Kim, G., Ahn, J.B., Kryjov, V.N., Lee, W.S., Kim, D.J., Kumar, A. (2021) Assessment of multi-model ensemble methods for WMO LC-LRFMME, *International Journal of Climatology*, vol. 41, pp. E2462-E2481, doi: 10.1002/joc.6858.

Kryjov, V.N. (2012) Seasonal climate prediction for North Eurasia, *Environ. Res. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 015203-1 – 015203-6, doi:10.1088/1748-9326/7/1/015203.

Kryjov, V.N., Min, Y.-M. (2016) Predictability of the wintertime Arctic Oscillation based on autumn circulation, *International Journal of Climatology*, vol. 36, pp. 4181-4186, doi: 10.1002/joc.461.

Krzysztofowicz, R. (1983) Why should a forecaster and a decision maker use Bayes theorem, *Water Resour. Res.*, vol. 19, pp. 327-336.

Min, Y.-M., Kryjov, V.N., Park, C.-K. (2009) Probabilistic Multimodel Ensemble Approach to Seasonal Prediction, *Weather and Forecasting*, vol. 24, pp. 812-828.

Min, Y.-M., Kryjov, V.N., Oh, S.-M. (2014) Assessment of APCC Multi-Model Ensemble Prediction in Seasonal Climate Forecasting: Retrospective (1983-2003) and Real-time Forecasts (2008-2013), *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 119(21), pp. 12, 132-12, 150, doi:10.1002/2014JD022230.

Min, Young-Mi., Kryjov, V.N., Oh, Sang Myeong, Lee, Hyun-Ju (2017) Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008-2015, *Climate Dynamics*, vol. 49, pp. 4141-4156, doi:10.1007/s00382-017-3576-2.

Min, Y.-M., Kryjov, V.N., Oh, J.H. (2011). Probabilistic Interpretation of Regression-Based Downscaled Seasonal Ensemble Predictions with the Estimation

of Uncertainty, *J. Geophys. Res.*, vol. 116, D08101- D08101-10, doi:10.1029/2010JD015284.

Murphy, A.H. (1977) The value of climatological, categorical, and probabilistic forecasts in the cost–loss ratio situation, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 105, pp. 803-816.

Palmer, T.N., Brankovic, C., Richardson, D.S. (2000) A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol. 126, pp. 2013-2034.

Rajagopalan, B., Lall, U., Zebiak, S. (2002) Categorical climate forecasts through regularization and optimal combination of multiple GCM ensembles, *Mon. Weather Rev.*, vol. 130, pp. 1792-1811.

Reichler, T., Roads, J.O. (2004) Time-Space Distribution of Long-Range Atmospheric Predictability, *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 61, pp. 249-263.

Robertson, A.W., Lall, U., Zebiak, S.E., Goddard, L. (2004) Improved combination of multiple atmospheric GCM ensembles for seasonal prediction, *Monthly Weather Review*, vol. 132, pp. 2732-2744.

Thompson, D.W.J., Wallace, J.M. (2000) Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month to month variability, *Journal of Climate*, vol. 13, pp. 1000-1016, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2).

Tracton, M.S., Kalnay, E. (1993) Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects, *Wea. Forecasting*, vol. 8, pp. 379-398.

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

Xie, P., Arkin, P.A. (1997) Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model output, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, pp. 2539-2558.

Статья поступила в редакцию (Received): 26.05.2021;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.06.2021;

Принята к публикации (Accepted): 13.06.2021.

Для цитирования / For citation:

Хан, В.М., Киктев, Д.Б., Кръжов, В.Н., Вильфанд, Р.М. (2021) Научно-методические основы интерпретации численных сезонных прогнозов в Северо-Евразийском климатическом центре, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 115-139, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-115-139.

Khan, V.M., Kiktev, D.B., Kryjov, V.N., Vilfand, R.M. (2021) Scientific and methodological basis of interpretation of numerical seasonal forecasts of NEACC, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 7, no. 2, pp. 115-139, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-115-139.