

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-108-122>

УДК 551.509.339



Оценка успешности ансамблевого долгосрочного метеорологического прогноза в Западной Арктике

И.А. Ильющенко¹✉, В.Ю. Цепелев^{1,2}

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

✉ ilyushenkova@aari.ru

ИД ИАИ, 0009-0006-9643-3063; ВЮЦ, 0000-0002-7386-7233

Аннотация. В статье приведен анализ применения ансамблевого подхода для составления долгосрочного метеорологического прогноза по Западной Арктике с заблаговременностью в один месяц. Прогноз среднемесячных полей давления на уровне моря и приземной температуры воздуха проводился по модели CFSv2. Представлены оценки успешности ретроспективных прогнозов за 2010–2018 гг. при помощи двух методов ансамблевого прогноза — метод среднего по всем членам ансамбля и метод прогноза по лучшему классу, выделенному из всего ансамблевого набора процедурой кластеризации. Рассмотрены четыре оценки успешности прогнозов: среднеквадратическая ошибка, коэффициент корреляции, коэффициент геометрического подобия между фактическим и прогностическим полями и среднеквадратическая мера мастерства. Для 2018 и 2024 гг. была дополнительно проанализирована успешность долгосрочного метеорологического прогноза по макроциркуляционному методу Вангенгейма–Гирса. Наиболее высокое качество прогнозов по методу лучшего класса отмечено в летний период, а среднеквадратическая ошибка прогнозов в это время минимальна. Прогноз по методу всех членов ансамбля предпочтительно использовать в зимний сезон.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, ансамблевый прогноз, долгосрочный прогноз погоды, Западная Арктика, оценка качества прогноза, приземная температура воздуха, давление на уровне моря, модель CFSv2

Для цитирования: Ильющенко И.А., Цепелев В.Ю. Оценка успешности ансамблевого долгосрочного метеорологического прогноза в Западной Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):108–122. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-108-122>

Поступила 25.11.2024

После переработки 21.02.2025

Принята 01.04.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Assessing the success of ensemble long-term meteorological forecasting in the Western Arctic

Irina A. Ilyushchenkova¹✉, Valerii Yu. Tsepelev^{1,2}

¹ State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

✉ilyushchenkova@aari.ru

 IAI, 0009-0006-9643-3063; VYT, 0000-0002-7386-7233

Abstract. The article presents quality assessments of using the ensemble approach to produce long-term meteorological forecast in the Western Arctic with a one-month advance. The assessment of retrospective forecasts' quality of the sea level pressure anomalies field and surface air temperature anomalies has been performed for 2010–2018. The ensemble forecast for the second month was made using two methods. The first method is the forecast of the mean field of meteorological parameters for all ensemble members. The second method is the forecast of the mean field made by the best class selected from all ensemble members by the clustering procedure. The best class was selected by comparing macrosynoptic process evolution of the first forecast month of each selected class with the actual observations. In the area considered, which is bounded by coordinates from 20° W to 100° E and from 60° N to 80° N, 108 retrospective forecasts were made. As an independent series, the forecast success for 2018 and 2024 was analyzed using two ensemble forecasting techniques and a synoptic-statistical method (the Wangenheim–Geers macro-circulation method). Three estimates of the forecast quality were obtained — the mean square error, the correlation coefficient between the forecast and actual fields of meteorological parameters, and the coefficient of geometric similarity of the forecast and actual fields of the meteorological parameter. The estimation of quality was made for two parameters — sea level pressure and surface air temperature. The highest quality of forecasts using the best class method is observed in the summer season, and the RMS error of forecasts is minimal at this time. The forecast by the method of all ensemble members is preferable in the winter season. The results show that, in general, the best-class ensemble forecasts are more accurate for forecasting the phase of pressure anomalies, while for forecasting the magnitude of temperature and pressure anomalies, it is preferable to use the forecasts for all ensemble members. For 2018 and 2024, both ensemble forecast methods showed higher forecast quality scores than the synoptic-statistical method.

Keywords: assessment of forecast quality, air temperature, atmospheric circulation, ensemble forecast, long-term weather forecast, surface air temperature, Western Arctic, sea level pressure, model CFSv2

For citation: Ilyushchenkova I.A., Tsepelev V.Yu. Assessing the success of ensemble long-term meteorological forecasting in the Western Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):108–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-108-122>

Received 25.11.2024

Revised 21.02.2025

Accepted 01.04.2025

Введение

Начиная с 1930-х гг. в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте в оперативном порядке разрабатываются долгосрочные прогнозы погоды с целью обеспечения безопасной и эффективной навигации по Северному морскому пути. Основы синоптико-статистического метода прогнозирования были заложены Г.Я. Вангенгеймом [1]. Хотя макроциркуляционный метод продолжает совершенствоваться и в настоящее время [2, 3], его дальнейшее развитие сдерживается ограниченной длиной ряда наблюдений и значительными климатическими изменениями

последних десятилетий, особенно заметными в Арктике [4]. В последние десятилетия в мировой практике происходит переход на методы численного моделирования атмосферных процессов для долгосрочного прогнозирования погодных процессов.

В настоящее время качество прогнозов атмосферной циркуляции, основанных на глобальных моделях атмосферы и океана, значительно улучшилось для сроков прогнозирования до двух недель. Однако проблема прогноза погоды на периоды более месяца все еще остается нерешенной [5]. Основными препятствиями для совершенствования численных моделей атмосферы остаются недостаточная плотность наблюдательной сети, ограниченное понимание физических процессов на различных временных и пространственных масштабах, дефицит вычислительных мощностей и несовершенство самих гидродинамических моделей. Ошибки в начальных и граничных условиях моделей нарастают в процессе их интегрирования. Уже через две недели результаты прогнозов становятся неприменимыми из-за превышения ими естественной изменчивости атмосферных процессов [6]. Атмосфера, будучи хаотической системой, чрезвычайно чувствительна к мелким возмущениям, что вызывает неопределенность детерминированных прогнозов [7].

Кроме того, на временных масштабах от месяца и более динамика атмосферы в большей степени определяется такими неадиабатическими источниками и стоками тепла, как океаны, снежный и ледяной покров, а также изменения притока солнечной радиации. Прогнозирование состояния этих источников и стоков тепла либо отсутствует, либо имеет недостаточное качество.

Для преодоления неопределенности прогнозов обычно используется ансамблевый подход. Для его реализации модель стартует от различных начальных условий, полученных путем внесения возмущений в данные наблюдений [8]. Ансамблевый прогноз дает множество равновероятных сценариев, представляющих диапазон возможных будущих состояний атмосферы. Истинное состояние атмосферы, как предполагается, находится в пределах дисперсии ансамбля. Исследования показывают, что усреднение по ансамблю улучшает прогнозы, хотя и приводит к сглаживанию экстремальных состояний и приближает результаты прогнозирования к климатической норме¹.

Задача выявления наиболее вероятного сценария из множества членов ансамбля остается актуальной. Для ее решения применяются нейронные сети, машинное обучение и методы классификации ансамблевых членов [9]. Также ведутся попытки объединить синоптико-статистические и гидродинамические методы прогнозирования для учета опыта синоптических школ [10, 11]. Однако выбор наиболее вероятного прогностического сценария из совокупности все еще остается нерешенной проблемой.

В настоящей статье представлены результаты оценки двух прогностических методов, применяемых к задаче прогноза погоды с заблаговременностью в два месяца для Западной Арктики. К ним относятся — метод прогноза поля метеопараметра, полученного по всему прогностическому ансамблю, и метод лучшего класса прогностического ансамбля [12]. Также в статье приведены примеры сравнения успешности прогнозов, разработанных ансамблевыми методами, с прогнозами, составленными синоптико-статистическим методом.

Основной целью проведенного исследования являлась оценка возможности применения ансамблевого подхода для долгосрочного прогноза полей аномалий давления

¹ Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию. Всемирная метеорологическая организация. Документ ВМО-№ 1091. М.; 2012. 24 с.

на уровне моря и приземной температуры воздуха в Западной Арктике. Авторами были протестированы две модификации ансамблевого метода: классический метод прогноза среднего по ансамблю и метод выбора лучшего класса прогностического ансамбля.

Материалы и методы

Для оценки качества ансамблевого прогноза в Западной Арктике использовались данные прогностической модели Climate Forecast System Ver. 2 (CFSv2), состоящие из 24 членов ансамбля [13]. За период с 2010 по 2018 г. авторами было рассмотрено 108 ретроспективных прогнозов среднемесячных аномалий приземной температуры воздуха и давления на уровне моря. Заблаговременность прогнозов составляла два месяца.

В качестве фактических данных, с которыми сравнивались прогнозы, рассматривались данные реанализа NCEP/NCAR Reanalysis 2, взятые в узлах регулярной сетки с шагом $2,5^\circ$ по широте и долготе [14].

Расчет оценок качества прогнозов производился для района Западной Арктики, ограниченного координатами от 20° з. д. до 100° в. д. и от 60° с. ш. до 80° с. ш. Выбор критериев для оценки качества прогнозов происходил с учетом рекомендаций ВМО^{2,3,4,5} и РД 52.27.284-91⁶. В качестве основных оценок качества прогнозов были использованы 4 критерия: среднеквадратическая ошибка прогноза, коэффициент корреляции между прогностическими и фактическим полями, коэффициент RO и мера мастерства.

Коэффициент RO отражает геометрическое подобие прогностического и фактического полей, является количественной оценкой качества прогноза знака аномалий метеорологических параметров. Прогноз в узле сетки считается оправдавшимся, если знак прогностической аномалии параметра совпадает со знаком аномалии в узле сетки фактического поля:

$$RO = \frac{n_+ - n_-}{N}, \quad (1)$$

где n_+ и n_- — число узлов регулярной сетки, где прогноз оправдался и не оправдался соответственно; N — общее число узлов регулярной сетки.

Мера мастерства определяет качество методического прогноза по сравнению со «стандартным». В качестве «стандартного» прогноза используется климатологический прогноз. Для идеальных прогнозов мера мастерства равна 1; если $MSSS = 0$, то качество методического прогноза находится на уровне «стандартного», а если $MSSS < 0$, то ниже «стандартного» прогноза. Рекомендации по использова-

² Наставление по Комплексной системе обработки и прогнозирования ВМО (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). ВМО-№ 485. 2023.

³ WMO's Standardized Verification System for Long-range Forecasts. New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-№. 485). Volume I. 2002.

⁴ Guidance on Verification of Operational Seasonal Climate Forecasts. WMO-№ 1220. 2018.

⁵ Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I — Global Aspects. WMO-№ 485. 2010.

⁶ РД52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Л.: Гидрометеониздат; 1991. 150 с.

нию меры мастерства приводятся в документе ВМО-№ 485 от 2023 г. Расчет меры мастерства осуществляется по формуле 2:

$$MSSS = 1 - \frac{\sum_j w_j MSE_j}{\sum_j w_j MSE_{cj}}, \quad (2)$$

где MSE_j — среднеквадратическая ошибка методического прогноза; MSE_{cj} — среднеквадратическая ошибка климатического прогноза; w_j — косинус широты ($\cos(\varphi_j)$), где φ_j — широта узла j широтно-долготной сетки.

При этом для прогноза, где исследуемый параметр имеет ту же амплитуду, что и наблюдения, $MSSS$ меньше нуля до тех пор, пока коэффициент корреляции между прогностическим и фактическим полем не достигнет значения $+0,5^7$. Поскольку для прогнозов погоды аномалий давления и температуры характерные коэффициенты корреляции, как правило, не превышают значения $0,35^8$, то полученные в работе оценки являются отрицательными.

Авторами также была проведена оценка статистической значимости результатов расчетов. Так как размер сетки сравниваемых данных составляет 49×9 узлов (всего 441), то при использовании доверительных интервалов 95 % все значения коэффициентов корреляции выше значений $+0,1$ или ниже $-0,1$ являются достоверными.

Метод выбора лучшего класса ансамбля предполагает классификацию всех членов ансамбля по полям приземной температуры и давления на уровне моря и выбор того класса, который максимально близок к фактически наблюдаемому состоянию атмосферы. Подробно алгоритм выбора лучшего класса прогностического ансамбля (сценария развития макропроцесса) приведен в работе В.Ю. Цепелева [12].

В настоящем исследовании авторами были составлены ретроспективные прогнозы полей аномалий давления и температуры с заблаговременностью два месяца. Далее к прогностическому ансамблю была применена процедура классификации по данным первого прогностического месяца. На следующем этапе проведено сравнение полей реанализа приземной температуры воздуха и давления на уровне моря первого месяца прогноза с прогностическими полями каждого из полученных классов ансамбля. В качестве прогноза на второй месяц был использован тот прогностический класс, поля аномалий давления и температуры которого имеют максимальную степень сходства с полями реанализа [12].

Анализ и результаты исследования

Для исследуемого района составлены прогнозы полей приземного давления и приземной температуры воздуха с заблаговременностью 2 месяца. На графиках рис. 1, 2, 3, в табл. 1 и 2 представлены следующие оценки качества ретроспективных ансамблевых прогнозов: RO — коэффициент геометрического подобия; $CORR$ — коэффициент корреляции; $RMSE$ — среднеквадратическая ошибка прогноза и $MSSS$ — мера мастерства.

Следует отметить, что оценки качества прогнозов, представленные на графиках и в таблицах, принимают низкие значения. Эти значения характерны для оценок

⁷ Guidance on Verification of Operational Seasonal Climate Forecasts. WMO-No 1220. 2018.

⁸ Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I — Global Aspects. WMO-№ 485. 2010.

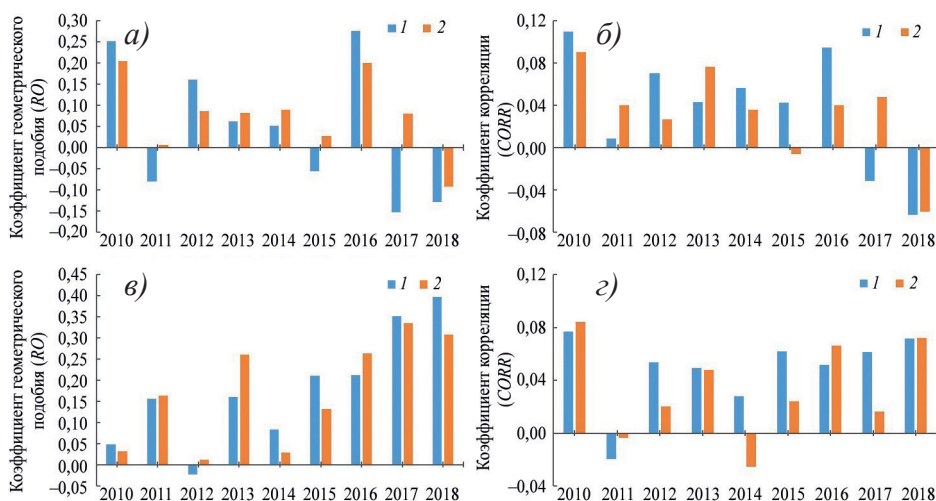


Рис. 1. Среднегодовые оценки качества RO и $CORR$ за период с 2010 по 2018 г. для двух типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a и $б$ соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха ($в$ и $г$ соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Fig. 1. Average annual quality estimates RO and $CORR$ for the period from 2010 to 2018 for two types of forecasts of sea level pressure anomalies (a and $б$, accordingly) and surface air temperature anomalies ($в$ and $г$, accordingly) for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

всех прогнозов с заблаговременностью от месяца и более, что показано в документе WMO-No. 1246⁹, где представлена таблица с характерными значениями оценок качества прогноза аномалий приземной температуры воздуха в Средиземноморском регионе по шести моделям. В таблице показано, что значения оценок качества прогнозов в виде коэффициентов корреляции не превышают величины $+0,34$. Исходя из того, что с увеличением широты падает качество прогнозов, представленные авторами результаты оценок качества прогнозов для Арктического бассейна являются характерными результатами для современных гидродинамических моделей.

Оценка качества прогноза полей аномалий давления по параметру RO (см. рис. 1а) положительна и значима в 2010, 2012, 2016 гг. с характерными значениями $+0,15 \dots + 0,27$ и отрицательна в 2017 и 2018 гг. с характерными значениями $-0,12 \dots -0,15$. При этом прогнозы по всему ансамблю показали лучшую успешность в 3 годах из 9 (2010, 2012 и 2016), а прогнозы по лучшему классу ансамбля в 6 оставшихся годах.

Оценка качества прогноза полей аномалий приземной температуры воздуха по параметру RO (см. рис. 1в), наоборот, растет со значений $+0,05$ в 2010 г. до значений $+0,39$ в 2018 г. Прогнозы по всему ансамблю показали лучшую успешность в 5 годах из 9 (2010, 2014, 2015, 2017, 2018), а прогнозы по лучшему классу ансамбля в остальных.

⁹ Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting. WMO-No. 1246. 2020.

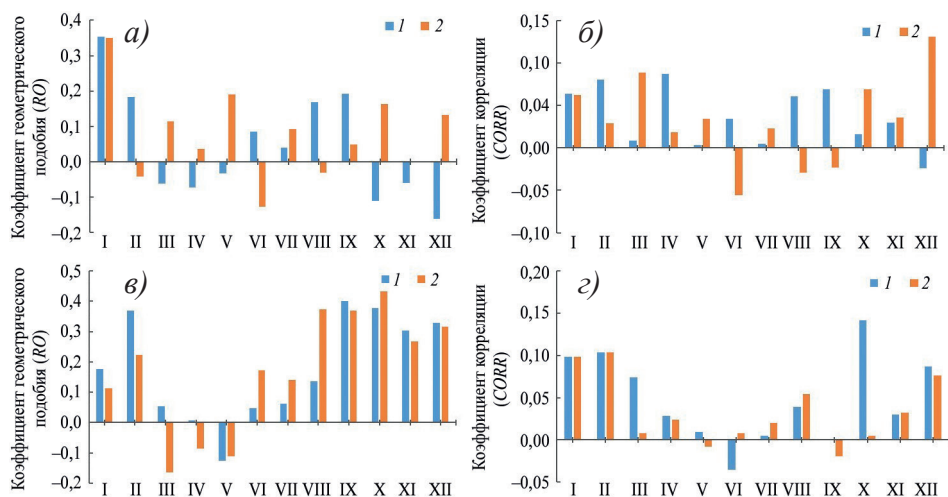


Рис. 2. Среднемесячные оценки качества RO и $CORR$ за период с 2010 по 2018 г. для двух типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a и $б$ соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха ($в$ и $г$ соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Fig. 2. Average monthly quality estimates RO and $CORR$ for the period from 2010 to 2018 for two types of forecasts of sea level pressure anomalies (a and $б$ accordingly) and surface air temperature anomalies ($в$ and $г$ accordingly) for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

Оценки качества прогнозов по коэффициенту корреляции как для полей аномалий давления, так и приземной температуры (см. рис. 1б и рис. 1г) показывают относительно более высокую успешность для метода прогнозов по всем членам ансамбля для 5 лет из 9. При этом среднегодовые оценки качества прогноза полей аномалий давления ниже уровня 95 % значимости за исключением 2010 г. (+0,11) и опускаются к отрицательным значениям в 2018 г. (−0,06). Для прогноза полей аномалий температуры среднегодовые оценки качества прогноза также статистически незначимы и находятся в диапазоне от +0,02 до +0,08. В отдельные месяцы параметры RO и $CORR$ как для полей аномалий давления, так и температуры достигают значений +0,3 ... +0,4.

Оценки $RMSE$ прогнозов аномалий давления и температуры для метода прогноза по всему ансамблю ниже, чем для метода прогноза по выбранному классу для всех рассматриваемых лет (см. рис. 3а и рис. 3б).

Для понимания внутригодового распределения оценок качества прогнозов по двум методикам построены графики оценок для каждого месяца (см. рис. 2).

Значения оценки RO (см. рис. 2а) статистически значимы и положительны для прогнозов аномалий давления по выбранному классу в январе, марте, мае, октябре и декабре. Отрицательные значения для RO наблюдаются в июне. Оценка RO для прогнозов по всем членам ансамбля положительна и статистически значима в январе, феврале, августе и сентябре и отрицательна в октябре и декабре. Успешность

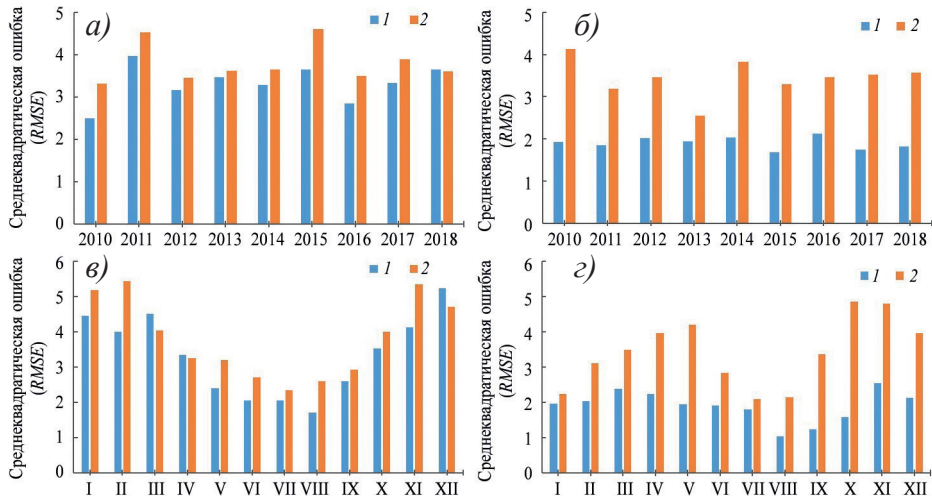


Рис. 3. Среднегодовые и среднемесячные оценки качества $RMSS$ за период с 2010 по 2018 г. для двух типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a и $в$ соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха ($б$ и $г$ соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Fig. 3. Average annual and monthly quality estimates $RMSS$ for the period from 2010 to 2018 for two types of forecasts of sea level pressure anomalies (a and $в$ accordingly) and surface air temperature anomalies ($б$ and $г$ accordingly) for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

прогнозов аномалий давления по параметру RO по выбранному классу выше, чем прогнозов по всем членам ансамбля, в марте, мае, июле, октябре и декабре. В январе оценки RO для обоих методов практически одинаковы и достигают значения $+0,35$. В свою очередь оценки RO для прогнозов по всем членам ансамбля выше, чем для прогнозов по выбранному классу, в феврале, июне, августе и сентябре.

Коэффициент корреляции (см. рис. 2б) между прогностическими и фактическими полями не превышает значения $+0,13$ для обоих методов. При этом качество прогнозов по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля в шести календарных месяцах — марте, мае, июле, октябре, ноябре и декабре. Качество прогнозов по всем членам ансамбля максимально в феврале, апреле, июне, августе и сентябре, а в январе оценки коэффициента корреляции для обоих методов практически одинаковы и не превышают величины $+0,07$.

Для всех календарных месяцев, кроме февраля и октября, среднеквадратическая ошибка прогнозов аномалий давления по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля (см. рис. 4в). Для прогнозов аномалий температуры среднеквадратическая ошибка прогнозов аномалий давления по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля (см. рис. 4г) в марте, апреле и декабре. Для обеих методик минимальная ошибка отмечается с мая по август, когда $RMSE$ находится в диапазоне $3,86$ – $5,30$.

Таблица 1

Оценки качества *MSSS* с 2010 по 2018 г. для полей аномалий давления на уровне моря для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Table 1

Quality estimates *MSSS* for the period from 2010 to 2018 for sea level pressure anomalies for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E

Месяц	Год																	
	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
I	–	–	–1	–1	0	–1	–1	1	1	1	–1	–1	1	1	–1	–1	1	0
II	1	1	0	–1	0	–1	1	–1	1	–1	–1	–1	0	–1	–1	–1	0	1
III	–1	1	–1	–1	–1	–1	1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	0	–1	–1	1
IV	1	–1	–1	–1	–1	0	–1	0	–1	–1	0	–1	0	–1	0	–1	–1	–1
V	0	–1	–1	–1	0	1	–1	0	–1	–1	1	–1	–1	0	–1	–1	0	–1
VI	–1	–1	0	–1	1	–1	1	–1	1	0	0	–1	–1	0	–1	–1	–1	–1
VII	–1	–1	0	1	–1	–1	–1	–1	1	1	–1	0	–1	–1	–1	–1	1	0
VIII	0	–1	1	–1	0	–1	1	1	0	–1	0	–1	0	–1	0	–1	–1	–1
IX	1	0	–1	–1	–1	0	1	–1	–1	–1	1	1	0	–1	1	1	–1	–1
X	–1	–1	–1	1	1	–1	–1	–1	1	1	0	–1	1	1	–1	–1	–1	–1
XI	–1	–1	–1	–1	–1	0	–1	–1	0	1	–1	–1	1	1	–1	–1	0	0
XII	1	1	–1	1	1	–1	–1	1	–1	–1	–1	1	–1	–1	–1	–1	–1	–1

Примечание. Типы прогнозов отмечены цифрами: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Note. The forecast types are indicated by numbers: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

При анализе оценок качества аномалий приземной температуры воздуха отмечено, что значения *RO* положительны для всех, кроме трех весенних, месяцев, как для прогнозов по выбранному классу, так и для прогнозов по всем членам ансамбля (см. рис. 2в). С ноября по апрель и в сентябре успешность прогнозов по всем членам ансамбля превосходит успешность прогнозов по выбранному классу. Только с мая по август и октябрю успешность прогнозов по выбранному классу выше, чем успешность прогнозов по всем членам ансамбля на величину от 0,1 до 0,2. Максимальная успешность прогноза знака аномалии температуры воздуха выявлена с августа по октябрь, а значение коэффициента *RO* составило от +0,38 до +0,43.

Коэффициент корреляции (см. рис. 2г) между прогностическими и фактическими полями аномалий приземной температуры низок и не превышает значение +0,14. Для прогнозов по выбранному классу он выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля в июле, августе и ноябре, а в зимние месяцы с декабря по февраль коэффициенты корреляции по обоим методам примерно равны и колеблются от +0,08 до +0,1. Максимальное качество прогнозов величины аномалий температуры воздуха отмечено в октябре для методики прогнозов по всем членам ансамбля. Значение коэффициента корреляции составило 0,14.

RMSE прогнозов полей аномалий давления по методу выбранного класса меньше, чем для *RMSE* прогнозов по методу всех членов ансамбля только в марте, апреле и декабре (см. рис. 3в), а для прогнозов полей аномалий температуры воздуха *RMSE* рассчитанное по методу выбранного класса всегда меньше, чем по методу всех членов ансамбля (см. рис. 3г). При этом разница в значениях *RMSE* для двух методов минимальна для прогнозов аномалий давления в апреле, июле и сентябре,

Таблица 2

Оценки качества *MSSS* с 2010 по 2018 г. для аномалий приземной температуры воздуха для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Table 2

Quality estimates *MSSS* for the period from 2010 to 2018 for surface air temperature anomalies for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E

Месяц	Год																	
	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
I	–	–	–1	–1	0	0	–1	–1	–1	1	0	–1	1	1	0	–1	1	1
II	1	1	1	1	0	–1	–1	1	1	–1	0	–1	1	0	0	–1	0	1
III	–1	–1	–1	–1	0	–1	1	–1	–1	–1	–1	–1	0	–1	–1	–1	0	–1
IV	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1
V	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1
VI	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1
VII	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	0	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1
VIII	–1	–1	–1	–1	–1	–1	0	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1
IX	–1	–1	0	–1	1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	1	–1	–1	–1	–1	–1
X	0	–1	1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	–1	0	–1	1	–1	1	–1
XI	–1	–1	–1	1	–1	–1	0	–1	–1	–1	0	–1	–1	0	–1	–1	–1	–1
XII	–1	–1	1	–1	–1	–1	–1	0	0	–1	1	1	–1	–1	1	0	1	–1

Примечание. Типы прогнозов отмечены цифрами: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Note. The forecast types are indicated by numbers: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

а прогнозов аномалий температуры в январе и июле. Максимальные значения *RMSE* по обоим методам наблюдаются в холодный период года, а минимальные в летний период. Минимум *RMSE* в прогнозах давления и температуры наблюдается в июле и августе. А максимум в октябре, ноябре и декабре, а для прогнозов аномалий давления дополнительно в январе и феврале.

Результаты оценок прогнозов полей аномалий давления по параметру мера мастерства (*MSSS*) представлены в таблице (табл. 1). Для прогнозов по выбранному классу полей аномалий давления на уровне моря положительные значения меры мастерства наблюдаются от двух случаев и более с сентября по март, а для прогнозов по всем членам ансамбля дополнительно в июне и августе.

Произведен анализ оценок качества прогнозов полей аномалий приземной температуры по параметру мера мастерства (табл. 2). Для прогнозов по выбранному классу положительные значения меры мастерства встречаются только в зимние месяцы, а для прогнозов по всем членам ансамбля дополнительно и в осенний период.

Анализ оценок качества прогнозов тестового периода

Для проверки полученных выводов о качестве прогнозов по методу среднего по ансамблю и методу лучшего класса ансамбля и сравнения их на ограниченном независимом материале с синоптико-статистическими прогнозами на месяц по Западной Арктике были взяты прогнозы за 2018 и 2024 гг. К сожалению, имеющийся ряд синоптико-статистических прогнозов ограничен только двумя годами и является недостаточным для репрезентативных выводов. В этой связи полученные результаты сравнения прогнозов носят иллюстративный характер.

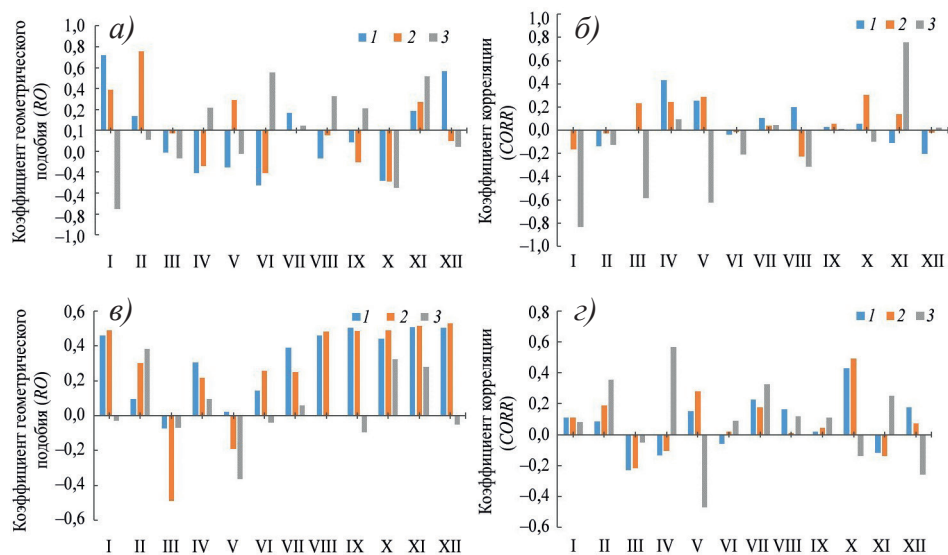


Рис. 4. Среднемесячные оценки качества RO и $CORR$ за 2018 и 2024 гг. для трех типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (а и б соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха (в и з соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д. Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля, 3 — оценка по синоптико-статистическому методу

Fig. 4. Average monthly quality estimates RO and $CORR$ for 2018 and 2024 for three types forecasts of sea level pressure anomalies (a and б accordingly) and surface air temperature anomalies (в and з accordingly) for the area from 60° N to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality, 3 — estimation of synoptic-statistical method quality.

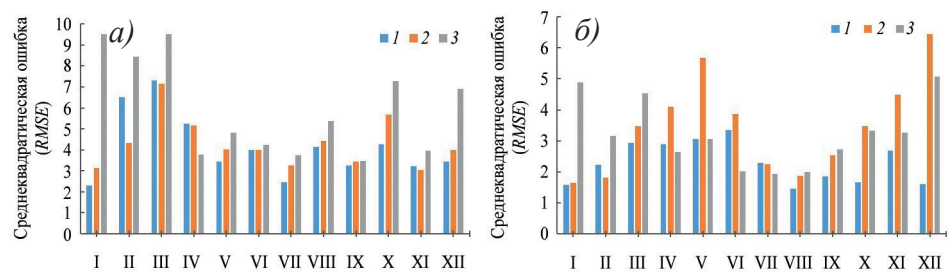


Рис. 5. Среднемесячные оценки качества $RMSE$ за 2018 и 2024 гг. для трех типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (а) и аномалий приземной температуры воздуха (б) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля, 3 — оценка по синоптико-статистическому методу

Fig. 5. Average monthly quality estimates $RMSE$ for 2018 and 2024 for three types forecasts of sea level pressure anomalies (а) and surface air temperature anomalies (б) for the area from 60° N to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality, 3 — estimation of synoptic-statistical method quality

Синоптико-статистический метод долгосрочного прогноза Вангенгейма–Гирса разрабатывается в оперативном порядке в лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов ГНЦ РФ «АНИИ».

Анализ оценок качества проводился для двух метеорологических параметров — аномалии давления на уровне моря и аномалии приземной температуры воздуха. На рис. 5 представлен график изменения следующих оценок качества изучаемых прогнозов — коэффициентов RO , $CORR$ и $RMSE$, осредненных по календарным месяцам.

Анализ полученных оценок качества для прогнозов полей аномалий давления на уровне моря показал, что прогнозы по методу лучшего класса RO выходят на первое место в феврале и мае (см. рис. 4а), а по синоптико-статистическому методу — в апреле, июне, августе, сентябре и ноябре. Метод прогноза по всем членам ансамбля наиболее успешен по оценке RO в январе, июле и декабре. Оценка по коэффициенту корреляции для синоптико-статистических прогнозов показала наихудшие значения из трех методов, кроме ноября, где он вышел на первое место (см. рис. 4б). В январе, феврале и мае зафиксировано наилучшее качество прогнозов по методу лучшего класса ансамбля, а прогнозы по всем членам ансамбля показали наилучшее качество из трех методов в апреле, июле и августе. Среднеквадратическая ошибка прогнозов по выбранному классу минимальна среди трех методов в мае и октябре (см. рис. 5а), а по синоптико-статистическому методу в апреле, июне, сентябре и ноябре. Минимальные значения среднеквадратической ошибки для метода прогноза по всем членам ансамбля отмечаются в январе и июле.

Анализ оценок качества прогнозов полей аномалий приземной температуры воздуха показал, что оценка RO имеет наибольшую величину из трех методов для метода лучшего класса ансамбля в мае, июне, августе и с октября по декабрь (см. рис. 4в). В остальные месяцы, за исключением апреля, максимальные оценки RO наблюдаются для прогнозов, составленных по всем членам ансамбля. В апреле более успешен синоптико-статистический метод прогнозов. Коэффициент корреляции для прогнозов по синоптико-статистическому методу имеет лучшую успешность в феврале, сентябре и ноябре (см. рис. 4г). Прогнозы по всем членам ансамбля наиболее успешны в январе, июле, августе и декабре. Прогнозы, составленные по лучшему классу ансамбля, являются лучшими в мае и октябре.

В апреле, июне и с августа по декабрь среднеквадратическая ошибка прогнозов по методу лучшего класса ансамбля максимальна из трех методов, а минимальное ее значение отмечается в сентябре (см. рис. 5б). Среднеквадратическая ошибка прогнозов, составленных по всем членам ансамбля, является минимальной из трех методов в декабре, январе и с августа по октябрь. Синоптико-статистический метод показывает наименьшую среднеквадратическую ошибку в феврале, апреле, июне, июле и ноябре.

Полученные для двух лет выводы не противоречат выводам, полученным из анализа ретроспективных прогнозов. Синоптико-статистический метод для этих двух лет не показывает абсолютного преимущества, поэтому совместное его использование с ансамблевыми методами может повысить общую успешность прогнозов. В дальнейшем планируется провести сравнение оценок качества всех трех методов на текущем материале в оперативном режиме.

Обсуждение результатов и выводы

Авторы исследования провели оценку качества прогнозов, составленных по двум разным методам ансамблевого долгосрочного прогноза. Анализ оценок качества прогнозов за период с 2010 по 2018 г. позволяет сделать следующие выводы.

1. Прогноз полей аномалий приземной температуры воздуха.

1.1. Метод прогноза по лучшему классу прогностического ансамбля показывает лучшие оценки качества по данным параметра RO , отражающего совпадение фактических и прогностических полей аномалий по фазе, чем оценки RO для прогнозов, осредненных по всем членам ансамбля, в месяцы теплого периода с мая по август. Метод прогноза по всем классам ансамбля показывает лучшую оправдываемость по RO в холодный период года с ноября по апрель. При этом максимальных значений от +0,38 до +0,43 параметр RO достигает в осенний, переходный период года с августа по октябрь.

1.2. Коэффициенты корреляции принимают значения, не превышающие величины +0,14. При этом прогнозы по всем членам ансамбля имеют лучшее качество в 50 % случаев, а прогнозы по лучшему классу ансамбля доминируют в июле, августе и октябре, то есть в летний и осенний периоды года.

1.3. Оценка $RMSE$ по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля, только в марте, апреле и декабре. При этом максимальные $RMSE$ наблюдаются во второй половине осени — в октябре, ноябре и декабре, а минимальные в теплый период — в июле и августе.

2. Прогноз полей аномалий давления на уровне моря.

2.1. Успешность прогнозов аномалий давления по параметру RO по методу выбранного класса максимальна в марте, мае, июле, октябре и декабре. Оценки RO для прогнозов по всем членам ансамбля выше, чем для прогнозов по выбранному классу, в феврале, июне, августе и сентябре.

2.2. Коэффициенты корреляции принимают значения, не превышающие величины +0,13, по обоим методам. При этом качество прогнозов по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля, в марте, мае, июле, октябре, ноябре и декабре, а по методу всех членов ансамбля — в феврале, апреле, июне, августе и сентябре.

2.3. Оценка $RMSE$ для всех календарных месяцев, кроме февраля и октября, по методу выбранного класса выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля. При этом максимальные $RMSE$ наблюдаются в холодный период — в октябре, ноябре, декабре, январе и феврале, а минимальные в теплый период — в июле и августе.

3. Оценка качества прогноза полей аномалий приземной температуры воздуха по параметру RO , наоборот, растет со значений +0,05 в 2010 г. до значений +0,39 в 2018 г. Прогнозы по всему ансамблю показали лучшую успешность в 5 годах из 9 (2010, 2014, 2015, 2017, 2018).

4. Оценки качества прогнозов по коэффициенту корреляции как для полей аномалий давления, так и приземной температуры показывают относительно более высокую успешность для метода прогнозов по всем членам ансамбля для 5 лет из 9.

Для подтверждения выводов, полученных за период 2010–2018 гг., необходимо провести дополнительные исследования на независимом прогностическом материале.

Исходя из анализа полученных оценок качества прогнозов по Западной Арктике можно предварительно выработать несколько рекомендаций.

1. По совокупности оценок, прогноз по методу лучшего класса прогностического ансамбля предпочтительней использовать в теплый период года, а по всем

членам ансамбля — в холодный период, как для прогноза полей аномалий давления, так и температуры.

2. В теплый период года среднеквадратические ошибки прогноза полей аномалий давления и температуры минимальны, а в холодный период года максимальны по обоим методам, что также дает преимущество методу прогноза по лучшим классам ансамбля в теплый период года.

3. Качество прогноза полей знака аномалии температуры максимально в осенний период с августа по октябрь.

4. Для получения выводов о преимуществе того или иного метода — ансамблевого прогноза или синоптико-статистического — необходимо провести дополнительные исследования.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИТР 5.1 Росгидромета на 2025–2029 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики».

Competing interest. The authors have no conflict of interest to declare.

Funding. The research was carried out within the framework of the scientific research and technology works 5.1 of Roshydromet for 2025–2029 “Development of models, methods and technologies for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), processes of ice interaction with natural objects and engineering structures for the Arctic”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вангенгейм Г.Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики. *Труды ААНИИ*. 1952;34. 314 с.
2. Иванов В.В., Алексеев Г.А., Коржиков А.Я. О совершенствовании макроциркуляционного метода долгосрочного метеорологического прогноза в Карском море. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018;4(370):105–121.
Ivanov V.V., Alekseyev G.A., Korzhikov A.Ya. On improvement of the microcirculation method for long-range weather forecasting in the Kara Sea. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* = *Hydrometeorological research and forecasting*. 2018;4(370):105–121. (In Russ.).
3. Иванов В.В., Алексеев Г.А. Метод долгосрочных метеорологических прогнозов и их уточнение с заблаговременностью от одного до трех месяцев по акватории морей Российской Арктики и результаты испытаний. *Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2020;47:79–94.
Ivanov V.V., Alekseyev G.A. The method of long-term meteorological forecasts and their refinement with a lead time of one to three months in the waters of the seas of the Russian Arctic and the test results. *Rezult'aty' ispy'tanij novy'x i usovershenstvovanny'x texnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskix prognozov* = *Test results of new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts*. 2020;47:79–94. (In Russ.).
4. Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылев Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020;13(3):3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika* = *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(3):3–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>

5. Bauer P., Thorpe A., Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*. 2015;525(7567):47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>
6. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2008;558:3–40.
Mirvis V.M., Meleshko V.P. Current status and further development of monthly and seasonal weather prediction. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova = Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2008;558:3–40. (In Russ.).
7. Mailier P.J. Can we trust long-range weather forecasts? In: A. Troccoli (Ed). *Management of weather and climate risk in the energy industry*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2010. P. 227–239. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3692-6_15
8. Palmer T.N., Molteni F., Mureau R., Buizza R., Chapelet P., Tribbia J. Ensemble predictions. *Technical Memorandum ECMWF*. 1992;1–46.
9. Chen L., Han B., Wang X., Zhao J., Yang W., Yang Z. Machine learning methods in weather and climate applications: a survey. *Applied Sciences*. 2023;13:12019. <https://doi.org/10.3390/app132112019>
10. Вильфанд Р.М., Мартазинова В.Ф., Цепелев В.Ю., Хан В.М., Мироничева Н.П., Елисеев Г.В., Иванова Е.К., Тищенко В.А., Уткузова Д.Н. Комплексирование синоптико-статистических и гидродинамических прогнозов температуры воздуха на месяц. *Метеорология и гидрология*. 2017;42(8):5–17.
Vil'fand R.M., Martazinova V.F., Tsepelev V.Yu., Xan V.M., Mironicheva N.P., Eliseev G.V., Ivanova E.K., Tishchenko V.A., Utkuzova D.N. Integration of synoptic and hydrodynamic monthly air temperature forecasts. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2017;42(8):485–493. <https://doi.org/10.3103/S1068373917080015>
11. Yun W.T., Stefanova L., Krishnamurti T.N. Improvement of the multimodel superensemble technique for seasonal forecasts. *Journal of Climate*. 2003;16(22):3834–3840. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3834:IOTMST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3834:IOTMST>2.0.CO;2)
12. Цепелев В.Ю. Классификация прогностического ансамбля как метод повышения качества долгосрочного прогноза погоды. *Оптика атмосферы и океана*. 2023;36(4):313–319. <https://doi.org/10.15372/AOO20230408>
Tsepelev V.Yu. Classification of the predictive ensemble as a method of improving the quality of long-term weather forecast. *Optika atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and ocean*. 2023;36(4):313–319. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/AOO20230408>
13. Saha S., Moorthi S., Pan H-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y-T., Chuang H-y., Juang H-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P.V., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., van den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010;91(8):1015–1058. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
14. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001;82:247–268. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2)