

Оценка качества ансамблевых сезонных прогнозов в Арктическом регионе

В.Ю. Цепелев

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга 38

Адрес для переписки: v0010200@mail.ru

Реферат. Арктический регион является важным элементом климатической системы Земли, и в условиях ускоряющихся климатических изменений возрастает потребность в достоверных сезонных прогнозах атмосферных условий. Цель настоящего исследования – оценка качества ансамблевых сезонных прогнозов ключевых метеорологических параметров в Арктике и выявление факторов, определяющих их предсказуемость. Анализ выполнен на основе ретроспективных ансамблевых прогнозов глобальной климатической системы CFSv2 с заблаговременностью до трёх месяцев. Верификация результатов проведена по данным атмосферного реанализа. Качество прогнозов оценивалось с использованием двух независимых показателей: коэффициента корреляции между прогнозными и наблюдаемыми аномалиями и метрики, характеризующей корректность воспроизведения знака и пространственной структуры аномалий. Показано, что прогнозы давления на уровне моря обладают более высокой и устойчивой предсказуемостью по сравнению с прогнозами приземной температуры воздуха, особенно при заблаговременности 2-3 месяца. Качество прогнозов демонстрирует выраженную сезонную зависимость: максимальные значения наблюдаются в холодный период года, тогда как летом предсказуемость заметно снижается. Установлено также, что положительный навык прогнозирования на первом прогностическом месяце может служить индикатором сохранения прогностической информации на более длительных заблаговременностях. Выявлена режимная зависимость качества прогнозов от состояния крупномасштабной циркуляции атмосферы: в фазе положительного Арктического колебания прогнозы, особенно для поля давления, оказываются статистически более информативными. Полученные результаты позволяют сформулировать практические рекомендации по интерпретации и использованию сезонных прогнозов в Арктике с учётом сезонных особенностей, циркуляционного режима и информативности отдельных метеорологических параметров.

Ключевые слова. Арктика, Арктическое колебаний, ансамблевый прогноз, качество прогнозов, температура воздуха, давление на уровне моря, CFSv2.

Assessment of the quality of ensemble seasonal forecasts in the Arctic region

V.Yu. Tsepelev

Abstract. The Arctic region plays a crucial role in the Earth's climate system, and the demand for reliable seasonal forecasts in this area is increasing under ongoing climate change. The aim of this study is to assess the quality of ensemble seasonal forecasts of key meteorological variables in the Arctic and to identify the factors controlling their predictability.

The analysis is based on retrospective ensemble forecasts produced by the CFSv2 climate forecasting system with lead times of up to three months. Forecasts were verified against atmospheric reanalysis data. Forecast skill was quantified using two complementary metrics: the correlation coefficient between predicted and observed anomalies and a parameter characterizing the accuracy of reproducing the sign and spatial structure of these anomalies.

The results show that forecasts of mean sea level pressure demonstrate higher and more stable predictability than forecasts of near-surface air temperature, particularly at lead times of two to three months. Forecast skill exhibits pronounced seasonality, reaching its maximum during the cold season and decreasing markedly in summer. It is also shown that positive forecast skill at a one-month lead time can serve as an indicator of the persistence of predictive information at longer lead times.

A clear regime dependence is identified: forecast skill, especially for the pressure field, is statistically higher during the positive phase of the Arctic Oscillation. These results provide a basis for practical recommendations on the interpretation and adaptive use of seasonal forecasts in the Arctic, taking into account seasonal predictability, circulation regimes, and the relative informativeness of different meteorological variables.

Keywords. Arctic, Arctic oscillation, ensemble forecast, quality assessment, air temperature, mean sea level pressure, CFSv2.

Введение

Арктический регион является ключевым элементом климатической системы Земли и оказывает существенное влияние на атмосферную циркуляцию средних широт, океанические процессы и состояние криосферы. В условиях ускоренных климатических изменений в Арктике возрастает потребность в надёжных сезонных прогнозах приземных метеорологических параметров, прежде всего температуры и давления воздуха.

Сезонные ансамблевые прогнозы являются основным инструментом вероятностного описания будущего состояния атмосферы на временных масштабах от одного до нескольких месяцев. Однако в высоких широтах их качество остаётся ограниченным и существенно зависит от сезона года, заблаговременности прогноза, типа прогнозируемого параметра и текущего циркуляционного режима атмосферы.

Современные исследования в области сезонного прогнозирования в основном сосредоточены либо на общей оценке качества сезонных прогнозов в Арктике, либо на анализе отдельных циркуляционных индексов. При этом недостаточно изучены:

- связь между качеством прогноза в первом прогностическом месяце и сохранением его прогностической информативности на последующих заблаговременностях;
- зависимость сезонной предсказуемости в Арктике от фазового состояния крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Настоящее исследование направлено на восполнение этих пробелов путём систематического анализа условной предсказуемости ансамблевых сезонных прогнозов. Проведена количественная оценка качества прогнозов приземных полей давления и температуры, изучена зависимость качества прогнозов на 2-й и 3-й месяц от качества прогнозов на первом прогностическом месяце, сезона года и текущей фазы атмосферной циркуляции и проанализировано вероятностное распределение метрик качества прогнозов. В исследовании предложен подход к использованию выявленных режимных зависимостей для определения возможности использования сезонных прогнозов на длительных временных интервалах.

Дополнительной задачей исследования было выявление индикаторов прогностической памяти ансамблевой системы CFSv2. Представлялось важным определить признаки, позволяющие на ранних этапах оценить вероятность сохранения прогностического сигнала для заблаговременностей свыше одного месяца.

Сезонная предсказуемость атмосферы в Арктике

Сезонная предсказуемость атмосферных процессов в Арктике традиционно считается ниже, чем в средних широтах. Это связано с повышенной ролью внутренней (хаотической) динамики атмосферы и сильным влиянием локальных факторов, таких как состояние ледового и снежного покрова (Overland, Wang, 2015). Вместе с тем, установлено, что определённый потенциал предсказуемости на сезонных масштабах обеспечивается крупномасштабными циркуляционными аномалиями. Ключевую роль играют режимы изменчивости, прежде всего Арктическое (АО) и Североатлантическое (NAO) колебания, состояние которых оказывает регулирующее влияние на перенос воздушных масс и температуру в регионе (Thompson, Wallace, 2000).

Исследования показывают, что предсказуемость арктической циркуляции имеет выраженную сезонность. В зимний период она возрастает благодаря усилению стратосферно-тропосферных связей и большей устойчивости синоптических процессов (Scaife et al., 2016). В летний сезон доминируют локальные и мезомасштабные процессы, сильно зависящие от теплообмена с подстилающей поверхностью, что приводит к резкому снижению потенциального прогностического навыка (Batté, Déqué, 2016).

Существует фундаментальное различие в предсказуемости различных метеорологических полей. Поля давления на уровне моря (*SLP*), определяе-

мые, в первую очередь, крупномасштабной динамикой, демонстрируют большую пространственно-временную устойчивость и, как следствие, более высокий прогностический потенциал. В то же время прогноз температуры воздуха вблизи поверхности ($T2m$) в высокой степени зависит от состояния подстилающей поверхности (морского льда, снега) и локальных теплообменных процессов, что существенно ограничивает его предсказуемость на длительных сроках (Smith, 2012). Этот контраст, известный как «парадокс сигнал-шум» (Scaife, Smith, 2018), когда модели лучше предсказывают циркуляцию, чем локальную температуру, является характерной чертой сезонного прогнозирования в высоких широтах.

Для успешного прогноза погоды на зиму необходим точный прогноз индекса АО, который является сложной научной задачей из-за многоступенчатой природы этого явления (Крыжов, 2021). Тем не менее, хотя аномалии давления в Арктике на 90% определяются АО при его экстремальных значениях, то влияние АО на температуру воздуха зимой в Центральной Арктике незначительно, так как оно компенсируется влиянием разрушения ледяного покрова. Для улучшения прогноза зимней фазы АО Крыжовым В.Н. было предложено использовать байесовский подход (Крыжов, 2017), в котором апостериорная вероятность осуществления фазы АО рассчитывается на основе частоты совместной встречаемости фазы АО и Таймырской циркуляционной аномалии. Предложенный подход позволяет составлять прогнозы с успешностью, превосходящей климатический прогноз на 15%.

Ансамбли прогностической системы CFSv2 уже более десяти лет используются для прогнозирования изменчивости АО в зимний период. В исследованиях было показано (Riddle, 2013), что небольшая, но статистически значимая часть межгодовой дисперсии (20%) зимней АО может быть предсказана с заблаговременностью до 2 месяцев.

Исследование, направленное на изучение влияния АО на предсказуемость зимней высокоширотной циркуляции (Zhihai Zheng, Jin Ban и др., 2021) показало, что существует связь между предсказуемостью циркуляции средних и высоких широт Евразии, полученной по модели BCC_AGCM2.2 и фазой АО. Наибольшая предсказуемость наблюдается в отрицательную фазу АО, а наименьшая в положительную. Различия в предсказуемости циркуляции объясняются знаком аномалии количества льда в Арктическом бассейне.

Ансамблевые сезонные прогнозы и оценка их качества

Современное сезонное прогнозирование базируется на ансамблевом подходе, который является стандартом в таких прогностических системах, как SEAS5 (ECMWF) (Stockdale, 2018), CFSv2 (NCEP) (Saha, 2014), ПЛАВ (Гидрометцентр РФ) (Вильфанд, Зарипов, 2019). Генерация ансамбля прогнозов позволяет количественно оценить неопределённость, связанную с ошибками начальных условий системы подстилающая поверхность – океан – атмосфера, несовершенством модельных параметризаций, и представить прогноз в вероятностной форме.

Качество таких ансамблевых прогнозов оценивается с помощью ряда метрик. Детерминистические метрики, такие как коэффициент корреляции (*CORR*) и среднеквадратическая ошибка (*RMSE*), измеряют точность совпадения прогностических и наблюдаемых полей или их аномалий. В отечественной практике принято дополнительно использовать коэффициент *RO*, который отражает степень геометрического сходства между прогностическими и фактическими полями и служит количественной мерой точности прогноза знака аномалий метеорологических параметров (Цепелев, 2023). Для оценки вероятностных прогнозов используются специальные метрики, например, CRPSS (Continuous Ranked Probability Skill Score) и Brier Skill Score (Wilks, 2011).

Метрики оценки качества субсезонных прогнозов обычно имеют невысокие значения. В руководящем документе Всемирной метеорологической организации приведен пример величины коэффициента корреляции, использованные для оценки качества прогнозов аномалий приземной температуры воздуха в Средиземноморском регионе (Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting, 2020). В примере показано, что коэффициенты корреляции прогнозов не превышают значения «+0.34». Поскольку в полярных широтах качество прогнозов ниже, то величина метрики для Арктики еще ниже. Важно учитывать, что даже статистически невысокие, но устойчиво положительные значения метрик также могут иметь практическую ценность при условии их корректной вероятностной интерпретации (Doblas-Reyes, 2013).

Условная предсказуемость и адаптивные методы в Арктике

В последние годы в сезонном прогнозировании активно развивается направление, связанное с анализом условной (режимно-зависимой) предсказуемости. Его суть заключается в том, что прогностический навык системы не является постоянной величиной, а зависит от текущего и прогнозируемого состояния климатической системы (Mariotti, 2018). Например, предсказуемость аномалий температуры или циркуляции может быть существенно выше в определённые фазы ENSO, Арктического колебания (АО) или специфических состояниях подстилающей поверхности (Kolstad, 2019). Это позволяет выявлять «окна предсказуемости» – периоды, когда уверенность в прогнозе априори выше. Дополнительным подходом к повышению качества прогнозирования является разработка адаптивных методов постобработки и динамическое взвешивание членов ансамбля на основе апостериорных оценок их качества. Селекция прогнозов, в зависимости от текущего циркуляционного режима, также использует режимные зависимости (Weisheimer, 2020).

Современный уровень исследований указывает на наличие значительного потенциала для совершенствования методологии использования сезонных прогнозов в Арктике. Настоящая работа направлена на восполнение существующих пробелов в методах прогнозирования путём комплексного анализа не только усреднённых ансамблевых прогнозов системы CFSv2, но и их изменчивости в зависимости от сезона, заблаговременности, качества стартового прогноза и фазы доминирующих режимов циркуляции.

***Критика исследований,
посвященных сезонной предсказуемости в Арктике***

Во всех рассмотренных исследованиях основное внимание уделялось изучению предсказуемости циркуляционного режима в Арктике, прежде всего фазы Арктического колебания, а также использованию интенсивности АО в качестве предиктора циркуляционных аномалий в умеренных и высоких широтах (Zhihai Zheng, 2021; Крыжов, 2017) или аномалий приземной температуры и осадков (Крыжов, 2021; Jung, 2014). В ряде исследований отмечалось уменьшение отношения сигнал/шум в прогностических системах при увеличении заблаговременности прогноза (Riddle, 2013), но не проводился детальный анализ того, какие именно метеорологические параметры и на каких заблаговременностях обладают наибольшей предсказуемостью и каким образом эти особенности могут быть использованы в прогностической деятельности. В большинстве работ основной акцент делается на путях улучшения климатических и прогностических моделей, тогда как рекомендации по оптимальному использованию уже существующих прогностических систем представлены значительно реже (Riddle, 2013; Weisheimer, 2020). Лишь в отдельных исследованиях (Крыжов, 2017; Kolstad, 2019) предпринимаются попытки анализа информативности прогнозных продуктов.

**Используемые данные и методы оценки
качества прогнозов**

Для оценки качества ретроспективных прогнозов среднемесячных аномалий приземной температуры воздуха и давления на уровне моря автором были использованы данные и методы, перечисленные в табл. 1.

Данные ансамблевых прогнозов

Для анализа в исследовании были использованы оценки качества ретроспективных ансамблевых сезонных прогнозов (hindcasts) среднемесячных аномалий приземной температуры воздуха и давления на уровне моря за период с 2010 по 2018 годы для Арктического региона севернее 65° широты. Всего было оценено 108 прогнозов, полученных по модели Climate Forecast System version 2 (CFSv2) Национального центра экологического прогнозирования США (NCEP) (Saha, 2010). Ансамбль ретроспективных прогнозов CFSv2 состоит из 24 членов, а метеопараметры представлены в узлах регулярной сетки с шагом 1°. В работе использовались ансамблевые средние значения прогнозов с заблаговременностью до 3 месяцев.

Верификационные данные

Верификация прогнозов выполнена по данным реанализа проекта «NCEP/NCAR Reanalysis 1» (Kalnay et al., 1996). Реанализ позволяет минимизировать влияние разреженности и неоднородности наблюдательной метеорологической сети в высоких широтах Северного полушария. Данные реанализа представлены в узлах регулярной сетки с шагом 2.5 градуса. С целью унифи-

кации с прогностическими, данные реанализа были переинтерполированы на сетку с шагом 1 градус.

Таблица 1. Данные и методы оценки качества прогнозов

Table 1. Data and Quality Assessment Methods

Компонент анализа	Описание
Регион исследования	Арктический регион севернее 65° с.ш.
Период	2010-2018 гг.
Прогнозируемые параметры	T2m (температура воздуха на уровне 2 м), SLP (давление на уровне моря)
Модель	Ансамблевый сезонный прогноз «CFSv2»
Заблаговременность	1, 2 и 3 месяца
Верификационные данные	«NCEP-NCAR Reanalysis 1»
Метрики качества	Коэффициент корреляции Пирсона; Параметр геометрического подобия полей аномалий
Дополнительный анализ	Условные оценки

Метрики и методы оценки

Методы оценки качества прогнозов

В качестве метрик качества ансамблевых прогнозов были использованы коэффициент корреляции Пирсона (CORR) и параметр геометрического подобия полей аномалий метеопараметров (RO).

- Коэффициент корреляции Пирсона (CORR):

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N (Tf - Tc)(Tp - Tc)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Tf - Tc)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Tp - Tc)^2}}, \tag{1}$$

где:

Tp – прогностическое значение аномалии в узле сетки;

Tf – фактическое значение аномалии в узле сетки;

Tc – климатическое значение.

- Коэффициент геометрического подобия прогностического и фактического полей аномалий метеопараметров (RO):

$$RO = \frac{n_+ + n_-}{N}, \tag{2}$$

где:

n_+ и n_- – число узлов регулярной сетки, в которых оправдался или не оправдался прогноз знака аномалии метеопараметра,

N – общее число узлов регулярной сетки.

Величина обеих метрик изменяется от -1 до $+1$. Для анализа устойчивости оценок использовались медианные значения коэффициентов.

С целью анализа изменчивости метрик $CORR$ и RO , временные ряды которых имеют в своем составе аномальные значения, производился расчет параметра IQR – Interquartile Range (межквартильный размах).

IQR представляет собой порядковую статистику, которая рассчитывается как мера разброса данных, равная разнице между третьим квартилем ($Q3$) и первым квартилем ($Q1$) вероятностного распределения оценок качества прогнозов

$$IQR = Q3 - Q1, \quad (3)$$

где:

$Q1$ и $Q3$ – это первый и третий квартили ряда значений $CORR$ и RO ,

IQR является непараметрической оценкой и не требует предположений о нормальности распределения. IQR робастен к выбросам и является альтернативой среднеквадратическому отклонению для рядов, имеющих в своем составе аномальные выбросы.

В условиях низкой плотности наблюдательной сети в Арктике невозможно однозначно восстановить фактические метеорологические поля. Оценки неизбежно наследуют неопределённости и погрешности присущие самим полям реанализа. Поэтому оценки качества прогнозов, рассчитанные по данным реанализа, являются вероятностными.

Оценка статистической значимости

Статистическая значимость оценок качества прогнозов оценивалась с использованием параметрического критерия Стьюдента (Белицкая, Двораковская, 2025). Для каждого месяца года и каждой заблаговременности проверялась нулевая гипотеза о равенстве среднего значения коэффициента корреляции Пирсона ($CORR$) нулю (одновыборочный t-критерий, двусторонний тест, уровень значимости $\alpha = 0.05$). В качестве выборки использовались все доступные значения $CORR$ и RO анализируемого периода (2010-2018 гг.). Статистически значимыми считались оценки качества, для которых среднее значение $CORR$ или RO достоверно отличалось от нуля ($p < 0.05$).

Для анализа условной предсказуемости дополнительно применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок, позволяющий оценить значимость различий между средними значениями $CORR$ на втором и третьем прогностических месяцах в зависимости от знака оценки качества на первом месяце прогноза ($CORR_1 > 0$ и $CORR_1 \leq 0$ или $RO_1 > 0$ и $RO_1 \leq 0$).

$$CORR|CORR_1 > 0 - CORR_2|CORR_1 \leq 0, \quad (4)$$

где:

$CORR_2$ – оценка качества прогнозов на втором прогностическом месяце;

$CORR_1$ – оценка качества прогнозов на первом прогностическом месяце.

Такой подход позволил количественно оценить наличие прогностической «памяти» ансамблевой системы и определить, сохраняется ли статистически значимое качество прогнозов при увеличении их заблаговременности.

Аналогичным образом была выполнена оценка режимной зависимости качества прогнозов, при которой распределения оценок *CORR* и *RO* сравнивались для положительной и отрицательной фаз Арктического колебания.

Во всех случаях статистические тесты применялись исключительно для интерпретации устойчивости средних оценок качества, тогда как в качестве основных характеристик распределений использовались медианные значения оценок и их межквартильный размах (IQR), обеспечивающие робастное описание типичного уровня прогностического качества и его вариабельность.

Результаты и их обсуждение

Общие результаты оценки качества прогнозов

В работе анализировалось вероятностное распределение метрик качества ансамблевых сезонных прогнозов по *CORR* и *RO*. Анализ показывает устойчивое различие в качестве прогнозов давления на уровне моря (*SLP*) и температуры на высоте 2 метра (*T2m*) на всех рассматриваемых заблаговременностях.

Для прогнозов *T2m* на первом месяце заблаговременности медианные значения *CORR* в большинстве сезонов находятся в интервале +0.2 – +0.4, но при этом IQR остаётся высоким, что указывает на высокую вариабельность качества прогнозов (табл. 2). С увеличением заблаговременности до двух и трёх месяцев происходит систематическое смещение распределений метрик *CORR* и *RO* в сторону нулевых и отрицательных значений, а также рост IQR. Это свидетельствует о быстром затухании прогностической информативности температурных аномалий (рис. 1).

Таблица 2. Метрики качества прогнозов по сезонам, заблаговременности прогнозов и параметрам и их значимость по критерию Стьюдента

Table 2. Assessment of forecast quality by seasons, forecast lead time, and parameters, and their significance according to Student's t-test

Пара-метр	Сезон	Прогн. месяц	<i>CORR</i>	IQR (<i>CORR</i>)	<i>RO</i>	IQR (<i>RO</i>)	<i>CORR</i> ≠ 0 (<i>t-test</i>)
<i>SLP</i>	Зима	1	0.4-0.5	низкий	0.35-0.45	низкий	да (p<0.05)
<i>SLP</i>	Зима	2	0.25-0.35	умеренный	0.20-0.30	умеренный	да (p<0.05)
<i>SLP</i>	Зима	3	0.15-0.25	умеренный	0.18-0.28	умеренный	на уровне погрешности
<i>T2m</i>	Зима	1	0.2-0.35	высокий	0.18-0.30	высокий	да (p<0.05)
<i>T2m</i>	Лето	1	≈0	очень высокий	≈0	очень высокий	нет
<i>T2m</i>	Лето	2-3	<0	максимум	<0	максимум	нет

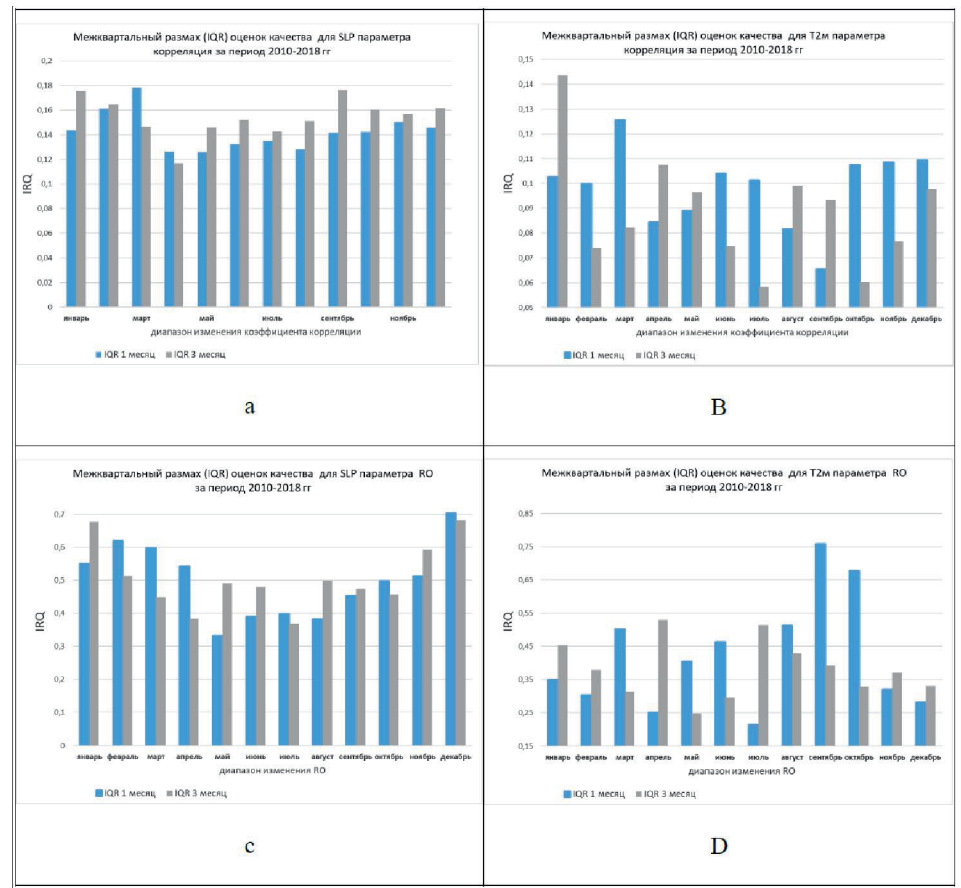


Рисунок 1. Межквартильный размах (IQR) метрик качества прогнозов с заблаговременностью 1 (синий) и 3 (серый) месяца (период 2010-2018 гг.). Показаны метрики: (а) корреляция (SLP), (б) корреляция (T2m), (с) RO (SLP), (д) RO (T2m)

Figure 1. Interquartile range (IQR) of 1-month (blue) and 3-month (grey) forecast skill metrics (2010-2018). Skill metrics are: (a) SLP correlation, (b) T2m correlation, (c) RO for SLP, (d) RO for T2m

В отличие от прогнозов *T2m*, прогнозы *SLP* характеризуются более высокими и устойчивыми оценками качества. На первом месяце медианные значения *CORR* устойчиво превышают значение +0.4 в холодный период года, а доля положительных значений *RO* остаётся статистически значимой даже при заблаговременности 2-3 месяца. Таким образом, поле давления обладает большей динамической памятью и, как следствие, более высокой сезонной предсказуемостью.

Для прогнозов *SLP* в холодный период года средние значения *CORR* статистически значимо отличаются от нуля по критерию Стьюдента ($p < 0.05$) как для первого, так и для второго прогностического месяца. Для прогнозов *T2m* значимые *CORR* наблюдаются только зимой и только в первом прогностическом месяце (табл. 2).

Важно подчеркнуть, что параметр *RO*, отражающий согласованность знака аномалий, демонстрирует более медленную деградацию с ростом забла-

современности прогнозов по сравнению с *CORR* и особенно для *SLP*. Это указывает на сохранение в прогнозах информации о крупномасштабной структуре аномалий даже при снижении их фазовой согласованности.

Распределения оценок качества (*CORR* и *RO*)

Анализ распределений метрик *CORR* и *RO* позволяет уточнить выводы, полученные на основе их средних и медианных значений. В холодный период года распределения метрик *CORR* и *RO* для *SLP* являются относительно узкими и одномодальными, с максимумом в области положительных значений (рис. 2). Это указывает на устойчивую работу прогностической ансамблевой системы и высокую согласованность членов ансамбля. Для *T2m* на этом же периоде наблюдается более широкое распределение метрик, но они также демонстрируют смещение в положительную область, что подтверждает наличие хотя и ограниченной, но статистически значимой предсказуемости.

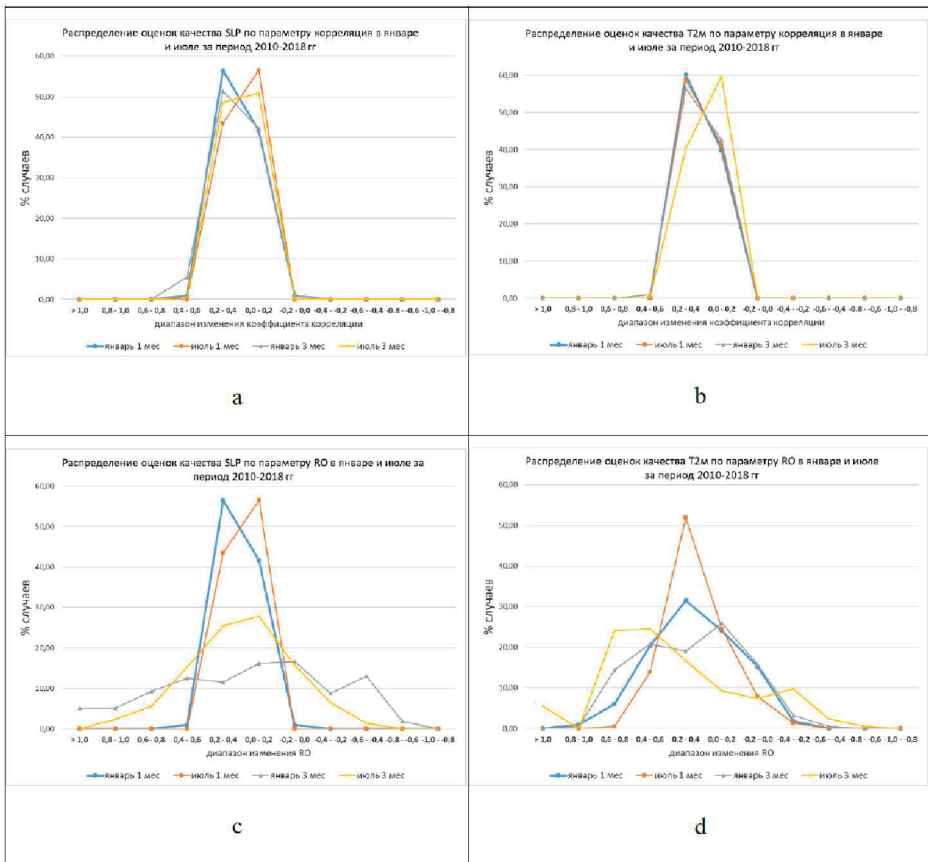


Рисунок 2. Распределение метрик качества прогнозов для января и июля за период 2010-2018 гг. Синий – январь 1 прогностический месяц, коричневый – июль 1 прогностический месяц, серый – январь 3 прогностический месяц, желтый – июль 3 прогностический месяц
a – корреляция для *SLP*, b – корреляция для *T2m*, c – *RO* для *SLP*, d – *RO* для *T2m*

Figure 2. Distribution of forecast skill metrics for January and July over the 2010-2018 period. Blue: January, 1-month lead time; Brown: July, 1-month lead time; Grey: January, 3-month lead time; Yellow: July, 3-month lead time. Panels show:
(a) *SLP* correlation, (b) *T2m* correlation, (c) *RO* for *SLP*, (d) *RO* for *T2m*

В тёплый сезон года распределения метрик $CORR$ и RO для $T2m$ становятся широкими, асимметричными и включают значительную долю отрицательных значений. Для метрик по SLP летнее ухудшение качества выражено слабее, что подтверждает вывод о различной физической природе предсказуемости давления и температуры.

Таким образом, анализ распределений метрик $CORR$ и RO показывает, что даже при близких средних значениях качество прогнозов может принципиально различаться по риску получения отрицательного результата и устойчивости прогнозов, что важно для практического использования прогнозной информации.

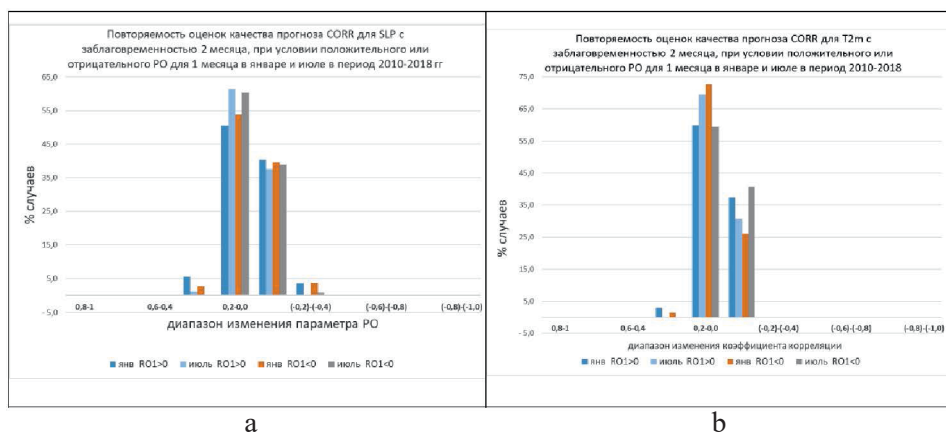
Отрицательные оценки качества прогнозов, тем не менее, не свидетельствуют о полной утрате прогностической ценности прогноза, но сигнализируют о необходимости осторожного их использования и дополнительной коррекции.

Условная предсказуемость ансамблевых сезонных прогнозов SLP и $T2m$

Для детального анализа прогностического потенциала ансамблевых сезонных прогнозов была рассмотрена их условная предсказуемость. Качество прогнозов на втором и третьем месяцах заблаговременности анализировалось в зависимости от качества прогноза на первом прогностическом месяце. В качестве критерия условной селекции прогнозов использовался знак метрики $CORR$ для первого месяца прогноза. Все прогнозы были разделены на две группы:

- а) с положительной оценкой качества прогноза в первом месяце ($CORR_1 > 0$);
- б) с отрицательной оценкой ($CORR_1 \leq 0$).

Для каждой группы прогнозов анализировались распределения значений метрик $CORR$ и RO на втором и третьем месяцах заблаговременности прогноза, что позволило количественно оценить вероятность сохранения положительных оценок качества прогнозов с заблаговременностью более одного месяца и выявить наличие прогностической «памяти» ансамблевой системы (рис. 3).



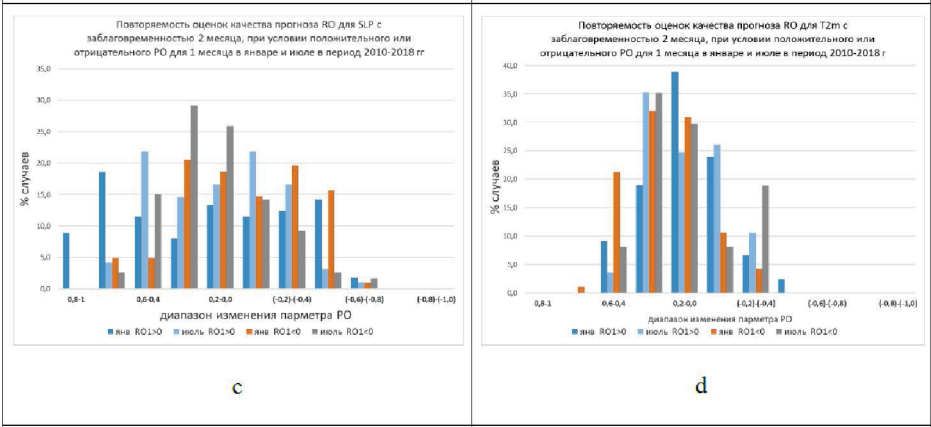


Рисунок 3. Частота повторяемости оценок качества прогноза с заблаговременностью 2 месяца, при условии положительной или отрицательной оценки качества (RO) в первом месяце. Данные представлены отдельно для января и июля за период 2010-2018 гг. Синий – январь, RO в первом месяце > 0; светло-синий – июль, RO в первом месяце > 0; коричневый – июль, RO в первом месяце < 0; серый – июль, RO в первом месяце < 0
a – корреляция для SLP, *b* – корреляция для T2m, *c* – RO для SLP, *d* – RO для T2m

Figure 3. Frequency of occurrence of 2-month lead forecast skill assessments, conditional on positive or negative skill (RO) in the first forecast month. Data are shown separately for January and July over the 2010–2018 period. Blue: January, Month 1 RO > 0; Light blue: January, Month 1 RO < 0; Brown: July, Month 1 RO > 0; Grey: July, Month 1 RO < 0

Panels show: (a) SLP correlation, (b) T2m correlation, (c) RO for SLP, (d) RO for T2m

Для оценки полезности условной прогнозируемости были рассчитаны разницы между первой группой метрик качества прогнозов *CORR* на втором и третьем прогностическом месяце и второй группой. При этом метрика *CORR* для первой группы в первом прогностическом месяце положительна, а для второй группы отрицательна (табл. 3).

Таблица 3. Метрика *CORR* двух групп прогнозов, сформированных по знаку *CORR* для первого прогностического месяца. Уровни значимости оценены по критерию Стьюдента

Table 3. Assessment of forecast quality (*CORR*) for two forecast groups formed based on the sign of *CORR* for the first forecast month. Significance levels was assessed using Student's t-test

Пара-метр	Условие 1 мес	Прогн. месяц	<i>CORR</i>	<i>IQR (CORR)</i>	<i>CORR</i> ≠ 0 (<i>t-test</i>)
<i>SLP</i>	$CORR_1 > 0$	2	положительный	низкий	да
<i>SLP</i>	$CORR_1 > 0$	3	положительный	умеренный	да
<i>SLP</i>	$CORR_1 \leq 0$	2-3	≈ 0 или < 0	высокий	нет
<i>T2m</i>	$CORR_1 > 0$	2	слабоположительный	высокий	на уровне погрешности
<i>T2m</i>	$CORR_1 \leq 0$	2-3	< 0	максимум	нет

Результаты анализа показывают, что для прогнозов поля аномалий *SLP* условное разбиение выявляет устойчивый эффект «прогностической памяти» ансамблевой системы. При положительных оценках качества прогноза в пер-

вом прогностическом месяце ($CORR_t > 0$) медианные значения $CORR$ на втором и третьем месяцах остаются положительными и статистически значимыми, а IQR существенно уменьшается, что указывает на рост устойчивости и согласованности ансамблевых оценок. В противоположном случае ($CORR_t \leq 0$) распределения оценок качества на последующих сроках заблаговременности смещаются в область нулевых и отрицательных значений и характеризуются повышенной вариабельностью.

Для температуры воздуха на уровне 2 м ($T2m$) эффект условной предсказуемости выражен слабее и носит более сезонно-зависимый характер. В холодный период года положительные оценки качества прогноза на первом прогностическом месяце сопровождаются повышением значений $CORR$ на втором месяце прогноза, однако статистическая значимость данного эффекта снижается при увеличении заблаговременности до трёх месяцев. В тёплый сезон года условная селекция по знаку оценок качества для первого месяца не приводит к систематическому улучшению оценок качества прогнозов температуры, что отражает доминирующую роль локальных термодинамических процессов и слабую память системы океан – лед – атмосфера.

С целью количественной оценки полученных зависимостей была выполнена проверка статистической значимости различий с использованием критерия Стьюдента для независимых выборок ($\alpha = 0.05$) между средними значениями метрик $CORR$ на втором и третьем месяцах группы прогнозов при $CORR_1 > 0$ и группы прогнозов с $CORR_1 \leq 0$. Для SLP различия между указанными группами оказались статистически значимыми, что подтверждает полезность использования принципа условной предсказуемости и возможность использования знака оценки качества прогнозов для первого месяца в качестве априорного индикатора надёжности прогнозов на более длительных сроках. Для $T2m$ статистически значимые различия оценок выявлялись лишь в отдельных зимних месяцах и, как правило, не сохранялись при увеличении заблаговременности.

Связь прогнозов с фазами атмосферной циркуляции

Сезонная изменчивость оценок качества ансамблевых прогнозов тесно связана с фазами атмосферной циркуляции (Cohen, 2014). Анализ распределений оценок прогнозов показывает, что успешность прогнозов в Арктическом регионе существенно зависит от фаз Арктического колебания (АО). Выявленная зависимость является статистически значимой и нелинейной по своей природе (рис. 4). Влияние фаз Арктического колебания (АО) проявляется не в виде детерминистического улучшения или ухудшения качества прогнозов, а через изменение статистических характеристик распределений метрик $CORR$ и RO .

В табл. 4 содержится количественная характеристика режимно-зависимой предсказуемости ансамблевых сезонных прогнозов в Арктике. Для количественного анализа использовались медианные значения метрик (как робастная мера центра) и интерквартильный размах (IQR , мера разброса) метрик $CORR$ и RO (табл. 4).

Таблица 4. Условные оценки качества прогнозов (*CORR/RO*) при различных фазах Арктического колебания, где «АО+» – положительная фаза, «АО-» – отрицательная фаза. «*IQR*» – Interquartile Range, $P(CORR) > 0$ – вероятность положительных оценок коэффициентов корреляции при данной фазе АО. Уровни значимости оценены по критерию Стьюдента для независимых выборок (АО⁺ vs АО⁻)

Table 4. Assessment of conditional forecast skill (*CORR/RO*) for different Arctic Oscillation phases, where "АО+" denotes the positive phase and "АО-" denotes the negative phase. "*IQR*" – Interquartile Range; $P(CORR) > 0$ is the probability of positive correlation coefficients for a given АО phase. Significance levels are assessed using Student's t-test for independent samples (АО⁺ vs АО⁻)

Параметр	Фаза АО	Сезон	Прогн. месяц	<i>CORR</i> медиана	<i>IQR</i> (<i>CORR</i>)	<i>RO</i> медиана	<i>IQR</i> (<i>RO</i>)	$P(CORR) > 0$	АО ⁺ ≠ АО ⁻
<i>SLP</i>	АО+	Зима	1	0.45	0.30-0.60	0.40	0.25-0.55	0.80	да (p<0.05)
<i>SLP</i>	АО+	Зима	2-3	0.30	0.15-0.45	0.28	0.10-0.40	0.65	да (p<0.05)
<i>SLP</i>	АО-	Зима	1	0.20	0.05-0.35	0.18	0.00-0.30	0.55	на уровне погрешности
<i>SLP</i>	АО-	Зима	2-3	0.05	-0.10-0.20	0.04	-0.15-0.18	0.40	на уровне погрешности
<i>T2m</i>	АО+	Зима	1	0.22	0.05-0.40	0.20	0.00-0.35	0.55	да (p<0.05)
<i>T2m</i>	АО-	Лето	1-3	-0.10	-0.30-0.10	-0.12	-0.35-0.25	0.25	нет

В положительной фазе АО происходит усиление зонального переноса и повышение устойчивости крупномасштабной циркуляции, что приводит к смещению распределений метрик *CORR* и *RO* в область положительных значений. В отрицательной фазе АО возрастает роль меридиональных возмущений и региональных процессов и наблюдается расширение распределений метрик, рост их изменчивости и увеличение вероятности осуществления оценок качества прогнозов близких к нулю.

Для прогнозов *SLP* данный эффект проявляется наиболее отчётливо и сопровождается уменьшением *IQR*, что указывает на рост устойчивости прогностической информации во времени (рис. 4b, 4d, табл. 4). Для *T2m* влияние положительной фазы АО выражено слабее и существенно модулируется сезоном года, особенно при заблаговременности более одного месяца (рис. 4a, 4c, табл. 4). Даже в условиях благоприятных циркуляционных режимов температурные прогнозы остаются чувствительными к локальным термодинамическим процессам, что ограничивает их устойчивую предсказуемость.

Различия в качестве прогнозов на противоположных фазах АО проявляются как статистическое смещение распределений метрик качества, а не как гарантированное улучшение прогноза, что подтверждается результатами анализа t-критерия Стьюдента.

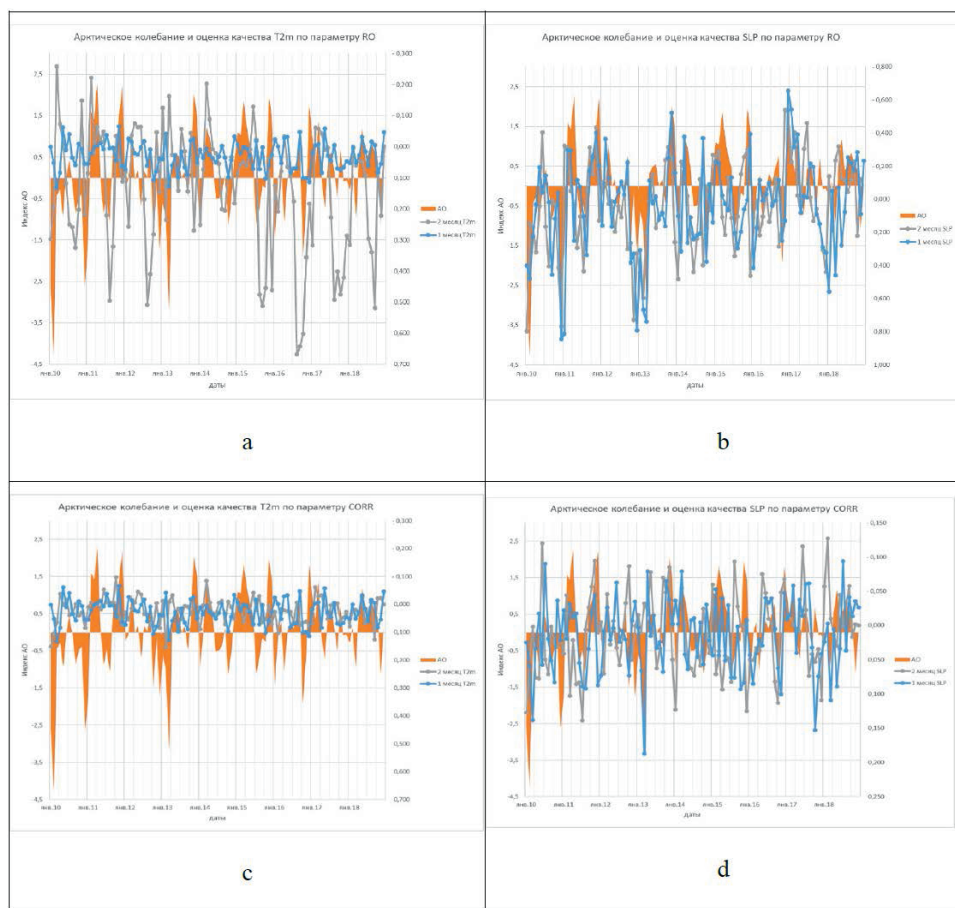


Рисунок 4. Индексы Арктического колебания (АО) и оценки качества прогноза. Синий цвет – прогноз на первый месяц, серый – прогноз на второй месяц. Коричневый цвет – индексы АО.
а – T2m по RO, б – SLP по RO, в – T2m по CORR, г – SLP по CORR

Рисунок 4. Arctic Oscillation (AO) indices and forecast skill assessments. Blue color represents the 1-month lead forecast, grey color represents the 2-month lead forecast. Brown color represents the AO indices. Panels show: (a) T2m by RO, (b) SLP by RO, (c) T2m by CORR, (d) SLP by CORR

Обсуждение результатов

Приведённый анализ позволил выявить ряд ключевых закономерностей в поведении метрик качества ансамблевых сезонных прогнозов CFSv2 для Арктики, а именно:

- а) существенное и устойчивое преимущество, выраженное в оценках качества, проявляется при прогнозе полей *SLP* в сравнении с прогнозом полей *T2m*;
- б) для прогнозов как *SLP*, так и *T2m* существует ярко выраженная сезонность. Максимальные оценки качества прогнозов *SLP* и *T2m* наблюдаются в холодный период года, которые затем резко снижаются в летний сезон, что особенно характерно для прогнозов *T2m*;

- с) выявляется «прогностическая память» системы, при которой качество прогноза на первом месяце является индикатором его информативности на последующих временных интервалах;
- d) наблюдается чёткая режимная зависимость оценок качества прогнозов от фазы Арктического колебания (АО), которая усиливает или ослабляет перечисленные выше закономерности.

Сезонность оценок качества прогнозов

Выявленные различия в поведении оценок качества прогнозов SLP и $T2m$ согласуются с физическими представлениями о сезонной предсказуемости атмосферных процессов в Арктике (табл. 2). Давление на уровне моря в этом районе определяется, в первую очередь, доминирующей ролью крупномасштабной атмосферной циркуляции, обладающей большей пространственно-временной устойчивостью, тогда как температура воздуха существенно зависит от локальных процессов теплообмена и состояния подстилающей поверхности.

Полученные результаты подтверждают, что сезонная деградация качества прогнозов является систематическим свойством ансамблевых прогнозов в Арктике. Для температуры воздуха наблюдается быстрое ухудшение оценок качества прогнозов с увеличением их заблаговременности, что связано с доминированием локальных термодинамических процессов и слабой памятью системы океан – лед – атмосфера в летний период.

Особенности вероятностных распределений оценок качества прогнозов

Распределения оценок качества ансамблевых прогнозов по метрикам $CORR$ и RO демонстрируют выраженную сезонную изменчивость формы вероятностного распределения, что указывает на нестационарный характер предсказуемости атмосферы в Арктическом регионе.

Анализ показывает, что метрики $CORR$ и RO дополняют друг друга и отражают различные аспекты прогностического качества. $CORR$ чувствителен к фазовым и амплитудным ошибкам и быстрее деградирует с ростом заблаговременности. Параметр RO , основанный на совпадении знаков аномалий, является более робастным и сохраняет положительные значения даже при снижении $CORR$.

При интерпретации сезонных прогнозов в Арктике целесообразно рассматривать RO как индикатор сохранения крупномасштабной структуры аномалий, тогда как $CORR$ является показателем их фазового соответствия.

Особенности условной предсказуемости ансамблевых сезонных прогнозов SLP и $T2m$ с заблаговременностью 2 и 3 месяца

Анализ условной предсказуемости показывает, что ансамблевая система CFSv2 обладает выраженной прогностической памятью прежде всего в отношении прогноза крупномасштабных полей давления на уровне моря. Испол-

зование информации о знаке оценки качества прогноза первого прогностического месяца позволяет повысить надёжность сезонных прогнозов *SLP* в Арктическом регионе и может рассматриваться как основа для разработки адаптивных методов отбора и взвешивания членов ансамблевых прогнозов. Для температуры воздуха подход имеет ограниченную применимость (табл. 3). Эффект условной предсказуемости корректно интерпретируется не как детерминистическая зависимость, а как проявление вероятностной «прогностической памяти» ансамблевой системы.

Физическая интерпретация режимной зависимости сезонных прогнозов

Количественный анализ подтверждает режимно-зависимую природу сезонной предсказуемости в Арктике (табл. 4), корни которой лежат в различии физических механизмов, определяющих изменчивость поля давления и температуры. Изменчивость качества прогнозов, обусловленная циркуляционными режимами, коренится в фундаментальном различии физики формирования полей приземного давления и температуры.

Поля давления формируются преимущественно под воздействием крупномасштабной циркуляции атмосферы и характеризуются наличием динамической памяти, что обеспечивает более высокую и устойчивую их предсказуемость. В положительной фазе АО циркуляция характеризуется усилением зонального переноса и относительной симметрией циркумполярного вихря, что способствует более организованной эволюции поля давления и повышает устойчивость прогностических оценок. В отрицательной фазе АО возрастает роль меридиональных переносов, усиливается региональная изменчивость и увеличивается чувствительность атмосферы к внутреннему динамическому шуму. Это приводит к росту разброса оценок качества и снижению их устойчивости.

Температура воздуха существенно зависит от состояния подстилающей поверхности, процессов турбулентного теплообмена, облачности и фазовых переходов в системе океан – лед – атмосфера. Даже при благоприятных циркуляционных условиях прогнозы температуры воздуха демонстрируют ограниченную устойчивость, что особенно выражено в тёплый период года.

Арктическое колебание выступает в роли индикатора степени организованности крупномасштабной циркуляции, влияя прежде всего на форму распределений оценок качества прогнозов и вероятность получения положительного результата при прогнозе полей метеопараметров.

Важно подчеркнуть, что фаза АО не является источником дополнительной предсказуемости сама по себе. При увеличении амплитуды АО усиливается синоптическая активность и ускоряется фазовая эволюция атмосферных волн, что может приводить к снижению фазовой согласованности прогнозируемых и наблюдаемых полей. Таким образом, режимная зависимость прогнозов носит вероятностный и нелинейный характер.

Выраженная сезонная и режимная модуляция оценок качества прогнозов *SLP* и *T2m* являются прямым следствием фундаментального различия в

физике формирования прогнозируемых полей. Если поле давления является динамически управляемым и обладающим памятью, то поле температуры термодинамически чувствительно и управляется множеством локальных обратных связей.

Новизна полученных результатов

Результаты настоящего исследования были направлены на анализ влияния фазы Арктического колебания на предсказуемость сезонных прогнозов основных метеорологических параметров на различных заблаговременностях. Следует подчеркнуть, что индекс АО рассматривался как индикатор информативности прогнозов, а не как предиктор в прогностических методах. Анализ вероятностного распределения метрик качества прогнозов показал, что различия между фазами АО проявляются в виде статистического смещения распределений соответствующих метрик и носят нелинейный характер. В частности, увеличение амплитуды положительной фазы АО сопровождается тенденцией к снижению качества прогнозов давления на уровне моря, что, возможно, связано с усилением динамической изменчивости атмосферной циркуляции в периоды сильной положительной фазы АО. Последнее приводит к росту внутренней вариабельности атмосферы и уменьшению прогностического сигнала.

Выводы

Проведённый комплексный анализ позволил количественно оценить и объяснить ключевые особенности поведения оценок качества ансамблевых сезонных прогнозов температуры и давления в Арктике, разработанных на основе модели CFSv2.

- а) Прогнозы давления на уровне моря демонстрируют более высокую и устойчивую предсказуемость по сравнению с прогнозами температуры воздуха на высоте 2 м, что обусловлено доминирующей ролью крупномасштабной атмосферной динамики.
- б) Качество прогнозов имеет выраженную сезонную зависимость, достигая максимальных значений в холодный период года и существенно снижаясь летом, особенно для температуры воздуха.
- с) Положительные оценки качества прогнозов на первом месяце заблаговременности являются вероятностным индикатором сохранения прогностической информативности на последующих временных интервалах, что свидетельствует о наличии прогностической памяти ансамблевой системы.
- д) Режимная зависимость, связанная с фазами Арктического колебания, проявляется в изменении формы и устойчивости распределений метрик качества прогнозов, а не как гарантированное их улучшение или ухудшение.

- е) Влияние циркуляционных режимов (фаз АО) на качество прогнозов является нелинейным: увеличение амплитуды положительной фазы АО, усиливая зональный перенос, может одновременно приводить к снижению фазовой согласованности прогнозов.
- ф) Совместное использование метрик *CORR* и *RO* позволяет более полно оценивать, как точность, так и надёжность сезонных прогнозов и, тем самым, снижать риск некорректной интерпретации прогнозной информации.

Полученные в исследовании результаты не только согласуются с выводами широкого круга исследований, подчеркивающих ключевую роль Арктического колебания (АО) в климатической системе, но и имеют самостоятельное значение с точки зрения практического использования сезонных прогнозов.

Практические рекомендации

На основе полученных результатов был предложен алгоритм практического использования ансамблевых прогнозов CFSv2, учитывающий сезонные особенности предсказуемости, характер циркуляционного режима и информативность отдельных метеорологических параметров (табл. 5). В соответствии с алгоритмом рекомендуется:

использовать оценки качества прогнозов на первом месяце заблаговременности как критерий доверия к прогнозам большей заблаговременности;

совмещать анализ распределений оценок качества прогнозов с состоянием фаз атмосферной циркуляции для повышения надёжности практического использования прогнозной информации;

для прикладных прогностических задач в Арктике приоритет следует отдавать прогнозам давления на уровне моря, а использование прогнозов температуры воздуха на срок более одного месяца должно сопровождаться адаптивной постобработкой и учётом циркуляционного режима.

Таблица 5. Использование режимно-зависимой информации для определения возможности использования сезонных прогнозов

Table 5. Assessing the usability of seasonal forecasts based on regime-dependent information

Шаг	Действие	Пояснение
1	Определение фазы АО	Используется для диагностики циркуляционного режима
2	Выбор параметра	Приоритет прогнозов SLP в зимний период и при АО+
3	Оценка первого месяца	Отбор прогнозов с положительным CORR
4	Анализ устойчивости	Анализ IQR и P_CORR>0
5	Принятие решения	Использование прогноза при низком риске некорректной интерпретации прогнозов
6	Постобработка	Режимно-зависимая коррекция и взвешивание

Список литературы

Белицкая, П.А., Двораковская, А.В. (2025) Статистический анализ и прогноз климатических изменений, *Вестник науки*, т. 11, № 92, с. 722-727, электронный ресурс, URL: <https://www.вестник-науки.рф/article/26264>.

Вильфанд, Р.М., Заринов, 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*, т. 4, № 374, с. 12-36. EDN: ATVKCN.

Крыжов, В.Н. (2017) Байесовский подход к вероятностному прогнозу зимней фазы Арктической осцилляции, *Труды Гидрометцентра России*, т. 366, с. 51-56.

Крыжов, В.Н. (2021) Климатические экстремумы зимы 2019/2020 в Северной Евразии: вклады климатического тренда и межгодовой изменчивости, связанной с арктической осцилляцией, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 5-16, doi:10.52002/0130-2906-2021-2-5-16.

Цепелев, В.Ю. (2023) Классификация прогностического ансамбля как метод повышения качества долгосрочного прогноза погоды, *Оптика атмосферы и океана*, т. 36, № 4, с. 313-319, doi:10.15372/AOO20230408.

Batté, L., Déqué, M. (2016) Randomly correcting model errors in the ARPEGE-Climate v6.1 component of CNRM-CM, applications for seasonal forecasts, *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 6, pp. 2055-2076, doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2055-2016>.

Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Jones, J. (2014) Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geoscience*, vol. 7, no. 9, pp. 627-637, doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>.

Doblas-Reyes, F.J., Garcia-Serrano, J., Lienert, F., Biescas, A. P., Rodrigues, L. R.L. (2013) Seasonal climate predictability and forecasting: status and prospects, *WIREs Climate Change*, vol. 4, no. 4, pp. 245-268, doi: <https://doi.org/10.1002/wcc.217>.

Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting, WMO (2020), no. 1246, URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/57090>.

Jung, T., Kasper, M. A., Semmler, T., et.al. (2014) Arctic influence on subseasonal midlatitude prediction, *Geophysical Research Letters*, vol. 41, pp. 3676-3680, doi:10.1002/2014GL059961.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 77, no. 3, pp. 437-471, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2).

Kolstad, E.W., Screen, J.A. (2019) Non-stationary relationship between autumn Arctic sea ice and the winter North Atlantic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, vol. 46, no. 13, pp. 7583-7591, doi: <https://doi.org/10.1029/2019GL083059>.

Mariotti, A., Ruti, P.M., Rixen, M. (2018) Progress in subseasonal to seasonal prediction through a joint weather and climate community effort, *Climate and Atmospheric Science*, vol. 1, no. 1, pp. 4-7, doi:<https://doi.org/10.1038/s41612-018-0014-z>.

Overland, J.E., Wang, M. (2015) Increased variability in the early winter subarctic North American atmospheric circulation. *Journal of Climate*, vol. 28, no. 18, pp. 7297-7305, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0395.1>.

Riddle, E.E., Butler, A.H., Furtado, J.C., et.al. (2013) CFSv2 ensemble prediction of the wintertime Arctic Oscillation, *Climate Dynamics*, vol. 41, pp. 1099-1116, doi:10.1007/s00382-013-1850-5.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Goldberg, M. (2010) The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 91, no. 8, pp. 1015-1058, doi:<https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P. Goldberg, M. (2014) The NCEP Climate Forecast System Version 2, *Journal of Climate*, vol. 27, no. 6, pp. 2185-2208, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>.

Scaife, A.A., Athanasiadis, P., Andrews, M.B., Arribas, A., Baldwin, M., Dunstone, N., Rixen, M. (2016) Seasonal winter forecasts and the stratosphere, *Atmospheric Science Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 51-56, doi:<https://doi.org/10.1002/asl.598>.

Scaife, A.A., Smith, D. (2018) A signal-to-noise paradox in climate science, *Climate and Atmospheric Science*, vol. 1, no. 1, pp. 28-30, doi:<https://doi.org/10.1038/s41612-018-0038-4>.

Smith, D.M., Scaife, A.A., Kirtman, B. P. (2012) What is the current state of scientific knowledge with regard to seasonal and decadal forecasting? *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 15-26, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015602>.

Stockdale, T.N., Johnson, S.J., Ferranti, L., Balmaseda, M.A., Briceag, L. (2018) SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system, *Geoscientific Model Development*, vol. 11, pp. 1087-1117, doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-11-1087-2018>.

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, no. 5, pp. 1000-1016, doi:[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).

Weisheimer, A., Schaller, N., O'Reilly, C., MacLeod, D.A., Palmer, T.N. (2020) How confident are predictability estimates of the winter North Atlantic Oscillation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 727, pp. 140-156, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3666>.

Wilks, D.S. (2011) Chapter 8 – Forecast Verification, *International Geophysics*, vol. 10, pp. 301-394, Academic Press, ISBN 9780123850225, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00008-7>.

Zhihai Zheng, Jin Ban, Yongsheng Li. (2021) The Effect of the Arctic Oscillation on the Predictability of Mid-High Latitude Circulation in December, *Frontiers Physics*, vol. 9, pp. 736-746, doi:10.3389/fphy.2021.736085.

References

Belitskaya, P.A., Dvorakovskaya, A.V. (2025) Statisticheskii analiz i prognoz klimaticheskikh izmeneniy [Statistical analysis and forecast of climate changes], *Vestnik nauki*, vol. 11, no. 92, pp. 722-727. Available at URL: <https://www.вестник-науки.рф/article/26264>.

Vil'fand, R.M., Zaripov, R.B., Kiktev, D.B., Kruglova, E.N., Kryzhov, V.N., Kulikova, I.A., Tishchenko, V.A., Tolstykh, M.A., & Khan, V.M. (2019) Dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy v gidromettsentre Rossii [Long-term meteorological forecasts in the Hydrometeorological Center of Russia], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 4(374), 12-36. EDN: ATVKN.

Kryzhov, V.N. (2017) Bayesovskiy podkhod k veroyatnostnomu prognozu zimney fazy Arkticheskoy ostillyatsii [A Bayesian approach to the probabilistic forecast of the winter phase of the Arctic Oscillation], *Trudy Gidromettsentra Rossii*, 366, 51-56.

Krijov, V.N. (2021) Klimaticheskie ekstremumi zimi 2019/202 v Severnoi Evrazii: vklad klimaticheskogo trenda I mezhgodovoi izmenchivosti, svyazannoi s arkticheskoi oscillatsiei, *Meteorologiya i Gidrologiya*, no. 2, pp. 5-16, doi: 10.52002/0130-2906-2021-2-5-16

Tsepelev, V.Y. (2023) Klassifikatsiya prognosticheskogo ansamblya kak metod povysheniya kachestva dolgosrochnogo prognoza pogody [Classification of the prognostic ensemble as a method to improve the quality of long-term weather forecast], *Optika atmosfery i okeana*, vol. 36, no. 4, pp. 313-319, doi:10.15372/AOO20230408.

Batté, L., Déqué, M. (2016) Randomly correcting model errors in the ARPEGE-Climate v6.1 component of CNRM-CM: applications for seasonal forecasts, *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 6, pp. 2055-2076, doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2055-2016>.

Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Jones, J. (2014) Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geoscience*, vol. 7, no. 9, pp. 627-637, doi:<https://doi.org/10.1038/ngeo2234>.

Doblas-Reyes, F.J., Garcia-Serrano, J., Lienert, F., Biescas, A.P., Rodrigues, L.R.L. (2013) Seasonal climate predictability and forecasting: status and prospects, *WIREs Climate Change*, vol. 4, no. 4, pp. 245-268, doi:<https://doi.org/10.1002/wcc.217>.

Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting (2020), WMO, no. 1246. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/57090>.

Jung T., Kasper M.A., Semmler T., et.al. (2014) Arctic influence on subseasonal midlatitude prediction, *Geophysical Research Letters*, vol. 41, pp. 3676-3680,

doi:10.1002/2014GL059961.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 77, no. 3, pp. 437-471, doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYP>2.0.CO;2).

Kolstad, E.W., Screen, J.A. (2019) Non-stationary relationship between autumn Arctic sea ice and the winter North Atlantic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, vol. 46, no. 13, pp. 7583-7591, doi:<https://doi.org/10.1029/2019GL083059>.

Mariotti, A., Ruti, P.M., Rixen, M. (2018) Progress in subseasonal to seasonal prediction through a joint weather and climate community effort, *Climate and Atmospheric Science*, vol. 1, no. 1, pp. 4-7, doi:<https://doi.org/10.1038/s41612-018-0014-z>.

Overland, J.E., Wang, M. (2015) Increased variability in the early winter subarctic North American atmospheric circulation, *Journal of Climate*, vol. 28, no. 18, pp. 7297-7305, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0395.1>.

Riddle E.E., Butler A.H., Furtado J.C., et.al. (2013) CFSv2 ensemble prediction of the wintertime Arctic Oscillation, *Climate Dynamics*, vol. 41, pp. 1099-1116, doi:10.1007/s00382-013-1850-5.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Goldberg, M. (2010) The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 91, no. 8, pp. 1015-1058, doi:<https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P. Goldberg, M. (2014) The NCEP Climate Forecast System Version 2, *Journal of Climate*, vol. 27, no. 6, pp. 2185-2208, doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>.

Scaife, A. A., Athanasiadis, P., Andrews, M.B., Arribas, A., Baldwin, M., Dunstone, N., Rixen, M. (2016) Seasonal winter forecasts and the stratosphere, *Atmospheric Science Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 51-56, doi:<https://doi.org/10.1002/asl.598>.

Scaife, A.A., Smith, D. (2018) A signal-to-noise paradox in climate science. *Climate and Atmospheric Science*, vol. 1, no. 1, pp. 28-30, doi:<https://doi.org/10.1038/s41612-018-0038-4>.

Smith, D.M., Scaife, A.A., Kirtman, B. P. (2012) What is the current state of scientific knowledge with regard to seasonal and decadal forecasting, *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 15-26, doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/015602>.

Stockdale, T.N., Johnson, S.J., Ferranti, L., Balmaseda, M.A., Briceag, L. (2018) SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system, *Geoscientific Model Development*, vol. 11, pp. 1087-1117, doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-11-1087-2018>.

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, no. 5, pp.1000-1016,doi:[https://doi.org/10.1175/15200442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2).

Weisheimer, A., Schaller, N., O'Reilly, C., MacLeod, D.A., Palmer, T.N. (2020) How confident are predictability estimates of the winter North Atlantic Oscillation? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 727, pp. 140-156, doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3666>.

Wilks, D.S. (2011) Chapter 8 – Forecast Verification, *International Geophysics*, vol. 10, pp. 301-394, Academic Press. ISBN 9780123850225, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385022-5.00008-7>.

Zhihai Zheng, Jin Ban, Yongsheng Li. (2021) The Effect of the Arctic Oscillation on the Predictability of Mid-High Latitude Circulation in December. *Frontiers Physics*, vol. 9, pp. 736-746, doi:[10.3389/fphy.2021.736085](https://doi.org/10.3389/fphy.2021.736085).

Статья поступила в редакцию (Received): 24.02.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 03.03.2026.

Принята к публикации (Accepted): 21.03.2026.

Для цитирования / For citation:

Цепелев, В.Ю. (2026) Оценка качества ансамблевых сезонных прогнозов в Арктическом регионе, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 12, № 2, с. 255-279, doi:[10.21513/2410-8758-2026-2-255-279](https://doi.org/10.21513/2410-8758-2026-2-255-279).

Tsepelev, V.Yu. (2026) Assessment of the quality of ensemble seasonal forecasts in the Arctic region, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 12, no. 2, pp. 255-279, doi:[10.21513/2410-8758-2026-2-255-279](https://doi.org/10.21513/2410-8758-2026-2-255-279).