

УДК 551.5

АНАЛИЗ ВНУТРИСЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ И ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕГИОНАЛЬНОГО МАСШТАБА В УМЕРЕННЫХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

© 2023 г. Р. М. Вильфанд^{а, *}, И. А. Куликова^{а, **}, В. М. Хан^{а, b, c, ****}, М. Е. Макарова^{а, ***}

^аГидрометцентр России, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1, Москва, 123376 Россия

^бИФА им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^сИнститут вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, 119333 Россия

*e-mail: romanvilfand@mail.ru

**e-mail: i.kulikova2009@yandex.ru

***e-mail: m_makarova@mail.ru

****e-mail: khan@mecom.ru

Поступила в редакцию 22.05.2023 г.

После доработки 01.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Рассматриваются вопросы, связанные с внутрисезонной изменчивостью и предсказуемостью атмосферных процессов регионального масштаба на Северном полушарии. Для идентификации последних используются индексы циркуляции, характеризующие крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Дается оценка региональной внутрисезонной изменчивости атмосферных процессов в летний и зимний сезоны 1991–2020 гг. Исследование практической предсказуемости региональных атмосферных процессов проводится с использованием глобальной полулагранжевой модели, разработанной в ИВМ РАН совместно с Гидрометцентром России, а также реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды на недельных и месячных масштабах времени. Делается вывод, что за пределами первой прогностической недели качество детерминистических (средних по ансамблю) прогнозов резко падает. В зимнее время исключением является регион Тихоокеанского-североамериканского колебания, где полезный сигнал прослеживается не только для первой, но и второй прогностической недели. Использование вероятностных прогнозов позволяет увеличить временной интервал предсказуемости по сравнению с детерминистическим подходом от одной недели до месяца. Наибольшие погрешности отмечаются в прогнозах режимов циркуляции на западе Северной Атлантики и северной части Тихого океана, – в регионах наиболее значительной внутрисезонной изменчивости. Полученные результаты предполагаются использовать в оперативной практике внутрисезонного прогнозирования Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ).

Ключевые слова: индексы циркуляции, моды атмосферной изменчивости, предсказуемость, внутрисезонные прогнозы

DOI: 10.31857/S0002351523050115, **EDN:** DJXTNI

1. ВВЕДЕНИЕ

Успехи в области гидродинамического моделирования процессов в атмосфере и океане, появление ансамблевых прогностических систем позволяют по-новому взглянуть на проблему долгосрочных прогнозов погоды, поставить вопрос о возможностях прогнозирования на внутрисезонных масштабах времени. Важную роль в развитии внутрисезонного прогнозирования сыграла ре-

ализация стартовавшего в 2013 г. под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) проекта по внутрисезонному прогнозированию S2S (Subseasonal to Seasonal Prediction Project). Заметим, что временной масштаб 7–30 дней является наиболее сложным для прогнозирования, поскольку роль начальных условий ослабевает, а влияние граничных условий (температуры поверхности океана, морского льда, снежного покрова и др.) еще не проявляется достаточно полным образом. Как отмечается в [Витар и др., 2019], в течение довольно длительного периода на фоне “неутешительных” прогнозов данный вре-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

менной масштаб был “пустыней в области прогнозируемости”.

В основе ограничений на предсказуемость атмосферных процессов лежит, с одной стороны, несовершенство численных моделей и ошибки в начальных данных, с другой, неустойчивость и хаотическое поведение самой атмосферы. В широком смысле понятие предсказуемости ассоциируется с искусством составления прогноза в условиях неопределенности его результатов. Количественные оценки предсказуемости основываются на результатах интегрирования конкретной гидродинамической модели. При этом различают практическую и потенциальную предсказуемость. В первом случае, как правило, используются оценки качества прогнозов (например, коэффициент корреляции аномалий, среднее квадратическое отклонение и т.д.). Во втором случае предсказуемость оценивается безотносительно к данным наблюдений и характеризуется метриками, основанными на сравнении одной из прогностических реализаций ансамбля с остальными членами (такими, как например, отношение сигнала к шуму, среднее по ансамблю, разброс ансамбля, информационная энтропия и др.) [Younas et al., 2013].

Важную роль в контексте предсказуемости играют атмосферные процессы регионального масштаба, от характера которых во многом зависит качество прогнозов температуры и осадков. Результаты статистического анализа позволяют выделить физически интерпретируемые региональные моды циркуляции, идентифицируемые количественным образом с помощью индексов дальних связей. В разных исследованиях “дальние связи” определяются по-разному. В классической работе Уолласа и Гацлера [Wallace et al., 1981] на основе корреляционного анализа полей геопотенциала поверхности 500 гПа выделены 14 “центров действия”, объединенных в пять основных систем дальних связей (так называемых, телеконнекций). Сходные барические структуры определяются также с помощью других статистических процедур, например, на основе анализа длительных аномалий циркуляции [Lau, 1981; Dole et al., 1983], повернутых естественных ортогональных функций [Horel, 1981; Barnston et al., 1987; Richman, 1986], “типов главных колебаний” (Principal Oscillation Patterns, POPs) и “типов главных колебаний по ограниченному времени” (Finite-Time Principal Oscillation Patterns, FTPOPs) [Frederiksen et al., 2005]. Несмотря на разнообразие подходов к идентификации основных мод атмосферной изменчивости, индексы “дальних связей”, полученные с помощью различных статистических процедур, хорошо коррелируют друг с другом и отражают сходные эквивалентно-баротропные структуры. Каждый из этих индексов представляет определенные региональные особенности атмосферной циркуляции, характери-

зующиеся, главным образом, оппозицией меридиональности (зональности) для соответствующих крайних положительных (отрицательных) значений.

В данной работе с использованием индексов дальних связей, предложенных Уоллесом и Гацлером [Wallace et al., 1981], исследуются внутрисезонная изменчивость и предсказуемость атмосферной циркуляции в различных регионах северного полушария. На базе реанализов (ERA5) [Hersbach, 2020] Европейского центра среднесрочных прогнозов (ЕЦСПП) дается оценка региональной внутрисезонной изменчивости атмосферных процессов в летний и зимний сезоны 1991–2020 гг. Исследование практической предсказуемости региональных атмосферных процессов проводится с использованием оперативных прогнозов индексов, полученных с помощью глобальной полулагранжевой модели (ПЛАВ) ИВМ РАН и Гидрометцентра России. Показано, что за пределами первой прогностической недели качество детерминистических (средних по ансамблю) прогнозов резко падает. Использование ансамблей позволяет повысить качество прогнозов и расширить интервал предсказуемости до месяца. Полученные результаты могут быть полезными в оперативной практике внутрисезонного прогнозирования.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следуя [Wallace et al., 1981], основными модами изменчивости атмосферной циркуляции в умеренных широтах Северного полушария будем считать: Восточно-атлантическое (EA – East Atlantic), Западно-атлантическое (WA – West Atlantic), Евразийское (EU – Eurasian), Западно-тихоокеанское (WP – West Pacific), Тихоокеанское-североамериканское (PNA – Pacific-North American) колебания. Важную роль в региональной изменчивости играют также Северо-атлантическое (NAO) и Полярное (POL) колебания (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_aoi_index/teleconnections.shtml). Индексы циркуляции (ИЦ) рассчитываются в суточной дискретности как отклонения от суточного климата с нормировкой на стандартные отклонения на основе полей геопотенциала поверхности 500 гПа (H500) отдельно для данных реанализа и гидродинамического моделирования. Методология расчетов ИЦ, идентифицирующих региональные моды атмосферной изменчивости, подробно изложена в [Киктев и др., 2015; Куликова и др., 2015].

На первом этапе исследовались особенности внутрисезонной изменчивости атмосферных процессов регионального масштаба. При этом использовались семь вышеуказанных ИЦ (EA, EU, NAO, PNA, POL, WA и WP), полученные на базе

реанализов ЕЦСПП (ERA5) средних суточных полей геопотенциала поверхности 500 гПа (H500) за период с 1991 по 2020 гг. (Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>). Характеристикой внутрисезонной изменчивости служили средние сезонные абсолютные значения разности (diff) между средними суточными значениями ИЦ, рассчитанные отдельно для зимнего и летнего сезонов 1991–2020 гг.:

$$\text{diff} = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} |x_{i+1} - x_i|, \quad (1)$$

где x_i – среднее суточное значение индекса, N – число дней в летнем или зимнем сезоне. Оценка линейных климатических трендов проводилась с использованием критерия Манна-Кендалла [Рукочовство, 2011]. Отсутствие во временных рядах diff статистически значимых (при 5%-м уровне значимости) климатических трендов позволило избежать процедуры “детрендования”.

Статистический анализ временных рядов средних сезонных абсолютных разностей (diff) был выполнен на основе квартильного анализа [Тьюки, 1981; Wilks, 2011], позволяющего получить достаточно “полную картину” данных путем сопоставления “боксов и усов” распределений на фоне характеристик средних значений. При этом статистикой положения служила медиана распределения (median), статистикой разброса (spread) – внутриквартильный размах (IQR = $q_{0.75} - q_{0.25}$), где $q_{0.25}$ и $q_{0.75}$ – соответственно нижняя и верхняя квартили данного распределения. Для проверки предположения о нормальности распределения исходной величины в качестве дополнительной характеристики рассчитывался коэффициент асимметрии (sample skewness coefficient SSC). Для определения выбросов и экстремумов “сверху” и “снизу” значений исходного ряда выделялись два уровня экстремальности. К первому уровню относились значения ряда, находящиеся за пределами интервала (UOF = $q_{0.75} + 3\text{IQR}$, LOF = $q_{0.25} - 3\text{IQR}$), – соответственно нижние и верхние выбросы. Ко второму уровню относились значения ряда за пределами квартильного интервала (UIF = $q_{0.75} + 3\text{IQR}/2$, LIF = $q_{0.25} - 3\text{IQR}/2$), называемые обычно нижними и верхними экстремумами, или экстремальными величинами. В качестве дополнительных характеристик определялись максимальное (max) и минимальное (min) значения ряда, а также число выбросов (outL и outU) – значений исходного ряда, находящихся за пределами LOF и UOF уровней. Результаты статистического анализа представлялись как в табличном виде, так и в виде графиков.

Второй этап исследования связан с оценкой практической предсказуемости индексов циркуляции. При этом исходной информацией служили оперативные прогнозы среднесуточных полей

геопотенциала поверхности 500 гПа (H500) модели ПЛАВ [Толстых и др., 2010] на летний и зимний сезоны 2018–2021 гг., стартовавшие (на 46 суток) от различных начальных дат с недельным интервалом (80 начальных дат соответственно для летнего и зимнего сезонов, 20 членов ансамбля). Оценки качества детерминистических прогнозов (средних по ансамблю) индексов циркуляции рассчитывались для 6 временных интервалов в отдельности: 1, 2, 3, 4 недели (1–7, 8–14, 15–21, 22–28 сутки соответственно) и два месячных интервала – месяц 1 (1–30 сутки), месяц 2 (16–45 сутки). В качестве эталонных полей, с которыми сравнивались результаты гидродинамического моделирования, использовались осредненные для тех же временных интервалов индексы, полученные на базе реанализов ЕЦСПП (ERA5) средних суточных полей геопотенциала поверхности 500 гПа (H500).

Сравнительный анализ индексов атмосферной циркуляции, полученных на основе фактических (reanalysis) и прогностических (forecast) данных, проводился на основе “диагностической” верификации [Murphy, 1994; Murphy et al., 1991; Murphy et al., 1987]. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на отдельные скалярные меры соответствия между прогнозами и наблюдениями (например, среднеквадратическая ошибка или коэффициент корреляция), диагностическая верификация предполагает рассмотрение совместной функции распределения вероятностей прогнозов и наблюдений. Статистический анализ последней позволяет идентифицировать основные преимущества и недостатки методики прогноза в целом не только с точки зрения специалиста – метеоролога, но и конкретного пользователя и добиться получения максимального экономического эффекта при использовании прогнозов [Wilks, 2000; Wilks, 1997].

В общем виде совместная функция распределения вероятностей прогнозов f_i (“forecast”), $i = 1, \dots, I$ и наблюдений o_j (“reanalysis”), $j = 1, \dots, J$ выражается следующим образом:

$$p(f_i, o_j) = \text{Pr}\{f_i \cap o_j\}, \quad (2)$$

где Pr – вероятность совместного выполнения (\cap – пересечения) событий f_i и o_j ($F < f$ и $O < o$).

Данная функция представляется, как правило, в виде таблиц или матрицы размером $I \times J$, составленной из относительных частот прогнозов и наблюдений. Хотя (числовые) описательные статистики легче воспринимать в виде таблиц, общую форму распределения значений переменной лучше исследовать на графике. На практике обычно используются различные виды факторизации данной функции, позволяющие для наглядности и решения задач интерпретации реализовать графическое представление исходной ин-

формации. Одним из возможных примеров факторизации является подход, предложенный в работе [Murphy et al., 1987]. При этом совместная функция распределения вероятностей представляется в виде:

$$p(f_i, o_j) = p(o_j | f_i) p(f_i), \quad (3)$$

где $p(o_j | f_i)$ – условная плотность распределения вероятностей (“calibration” – “калибровка”), $p(f_i)$ – безусловная плотность распределения вероятностей (“refinement” – “уточнение”).

Результаты верификации в этом случае могут быть представлены с использованием графических портретов двух распределений $p(o_j | f_i)$ и $p(f_i)$, которые называются диаграммами надежности. Другими примерами приближения искомой двумерной плотности распределения вероятностей пар “прогноз” – “наблюдение” могут служить квантильные диаграммы и диаграммы рассеяния. Графики и диаграммы дают качественную, но более полную, информацию о распределении, которая не может быть полностью выражена каким-то одним численным показателем.

В качестве количественных характеристик качества дополнительно рассчитывались средняя (ME), средняя абсолютная (MAE) и средняя квадратическая (RMSE) ошибки, а также коэффициент корреляции (CC), коэффициент детерминации ($DT = CC^2$) и вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы на согласованность с имеющимися выборочными данными (pval). Задача статистического оценивания средних значений CC выполнялась с помощью непараметрического метода повторных выборок с возвратом – бутстрепа [Wilks, 2011].

3. ВНУТРИСЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНДЕКСОВ ЦИРКУЛЯЦИИ

Оценки внутрисезонной изменчивости, в качестве которых используются средние сезонные абсолютные значения разности между средними суточными значениями индексов (diff), могут служить косвенными показателями атмосферной устойчивости. В соответствии с классической концепцией энергетического цикла, сформулированной Лоренцем [Лоренц, 1987], устойчивость атмосферных процессов определяется взаимными переходами потенциальной и кинетической энергии. Математическая теория, описывающая баротропные преобразования энергии и основной “бароклиный” переход – преобразование вихревой доступной потенциальной энергии в кинетическую энергию возмущений, подробно изложена в [Дымников, 2007; Филатов, 1989]. На практике получение численных оценок энергетических переходов сопряжено с рядом трудностей, связанных, прежде всего, с неопределенностями

в расчетах вертикальной скорости (или компонент негеострофического ветра), что заставляет прибегать к косвенным характеристикам. Не претендуя на точность определения устойчивости, для удобства изложения в дальнейшем будем использовать как синонимы термины “внутрисезонная изменчивость” и “устойчивость” атмосферных процессов.

Общая картина региональной внутрисезонной изменчивости/устойчивости для летнего и зимнего периодов 1991–2020 г., полученная с использованием временных рядов diff, представлена на рис. 1. Квартильные диаграммы обнаруживают хорошо выраженные региональные различия внутрисезонной изменчивости. Наименьшие значения медианы распределений, а также наименьшие боксы, в пределах которых сосредоточено 50% значений параметра diff, характерны для региона PNA-колебания. Атмосферная циркуляция здесь характеризуется наименьшей внутрисезонной изменчивостью, обеспечивая, наряду с медленно меняющимся термическим состоянием океана, более значительный по сравнению с другими регионами резерв памяти. Речь может идти о долгосрочной предсказуемости “слабо неустойчивых” процессов или “устойчивых” термобарических структур, так называемых двумерных волн Россби, индуцируемых термическими процессами в экваториальной зоне и распространяющимися на северо-восток вдоль большого круга земного шара. Эти волны прослеживаются в зоне Тихоокеанского–североамериканского колебания атмосферной циркуляции в полях геопотенциальных высот поверхности 500 гПа [Seo et al., 2016].

Наиболее заметные различия между регионами наблюдаются за пределами верхнего и нижнего квартиля, т.е. в области выбросов и экстремальных величин. Наличие выбросов может быть связано с возможными ошибками, обусловленными завышением (занижением) степени внутрисезонной изменчивости. Наиболее значительная внутрисезонная изменчивость, как с точки зрения средних, так и экстремальных величин, наблюдается над океанами (индексы WA, WP и NAO-колебаний), а также в Арктике (индекс POL). При этом наиболее активным образом ведут себя регионы WA и WP-колебаний (запад Северной Атлантики и северной части Тихого океана), являющиеся ключевыми областями генерации циклонов и бароклиной неустойчивости во всем Северном полушарии. Активность циклонической деятельности поддерживается неадiabатическими притоками тепла, максимумы в распределении которых приблизительно соответствуют указанным выше районам [Уоллес и др., 1988]. Относительно невелика с небольшим повышением в зимнее время внутрисезонная изменчивость в Северной Евразии (индексы EA и EU-колебаний). Более “спокойной” зимой, по

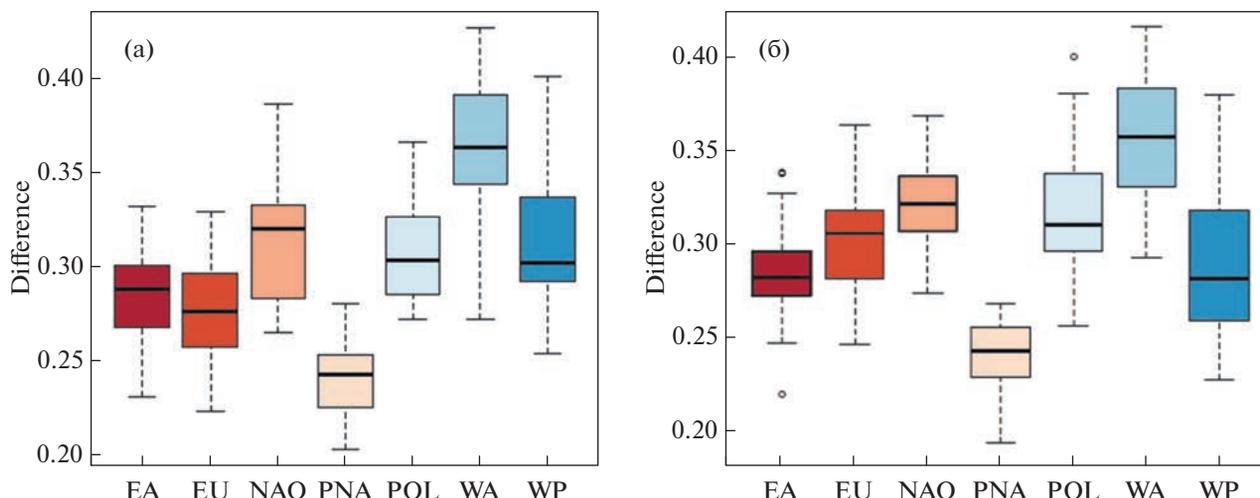


Рис. 1. Внутрисезонная изменчивость (diff) индексов циркуляции в летний (а) и в зимний (б) период 1991–2020 гг. (ре-анализ ERA5).

сравнению с летним периодом, становится циркуляция в регионе WP-колебания.

Таблица 1 подтверждает указанные региональные различия количественным образом. В географическом распределении максимумы внутрисезонной изменчивости по всем статистикам отмечаются на западе океанов. “Слабая неустойчивость” характерна для региона PNA-колебания. Распределение diff и летом, и зимой в большинстве случаев отличается от нормального. Положительно скошенное распределение, характерное для регионов POL и WP – колебаний, имеет длинный хвост с правой стороны, указывающий на предпочтительное (относительно среднего значения diff) неустойчивых режимов циркуляции. Для региона PNA-колебания зимой, наоборот, отрицательно скошенное распределение свидетельствует о преобладании более устойчивых по отношению к среднему значению diff атмосферных процессов.

На основе анализа временных рядов diff для периода 1991–2020 гг. составлены каталоги атмосферных процессов для каждого региона северного полушария в отдельности (в порядке убывания значений diff). Каталогизация временных рядов позволяет выделить годы с устойчивой и неустойчивой атмосферной циркуляцией и выявить процессы, обладающие “долговременной памятью”. Так, например, на фоне устойчивых режимов атмосферной циркуляции, связанных с NAO и EU-колебаниями, на территории Северной Евразии летом 2018 г. (2-е место снизу в рейтинге внутрисезонной изменчивости) отмечались значительные положительные аномалии температуры воздуха, а продолжительность волн тепла на севере и западе Европы местами превышала 20–30 дней. Устойчивый характер атмосферных процессов был связан с преобладанием антицик-

лонических форм атмосферной циркуляции, — над Европой, Уралом и территорией Сибири (преимущественно Западной) формировались блокирующие гребни и антициклоны, полностью нарушившие зональный перенос. Итогом атмосферной устойчивости стала жара и засуха, а также новые температурные рекорды. В странах Западной Европы, на Урале, в Сибири и в Забайкалье бушевали сильнейшие за последние десятилетия пожары.

В зимнее время в рейтинге неустойчивости атмосферных процессов сразу в трех регионах EA, NAO и POL — одно из последних мест занимает зима 2009–2010 гг., вписываясь в метеорологическую историю необычайными температурными контрастами. В течение всего зимнего периода зональный перенос был нарушен и на большей части северного полушария преобладали меридиональные формы атмосферной циркуляции. Евразия и Северная Америка испытывали необычайно холодные условия. Сильные морозы в течение длительного времени удерживались и на территории Российской Федерации, в Сибири месячные аномалии температуры воздуха составляли $-9...-11^{\circ}\text{C}$. С другой стороны, на северо-востоке Америки, в Канаде, Гренландии, на арктических островах и арктическом побережье Восточной Сибири и Чукотки было очень тепло. Значительные положительные аномалии температуры воздуха отмечались в прилегающей к Северной Атлантике части Арктики, включая море Баффина и пролив Дэвиса. Сильные снегопады прошли в Великобритании, в Китае и в Корее.

В классических исследованиях устойчивость атмосферных процессов ассоциируется с их предсказуемостью [Дымников, 2007; Филатов, 1989]. Связи устойчивости и предсказуемости атмосферных процессов подтверждаются и многолет-

Таблица 1. Статистические характеристики временных рядов средних сезонных абсолютных разностей между средними суточными значениями индексов diff*100 (летний и зимний сезоны 1991–2020 гг.)

Лето							
	EA	EU	NAO	PNA	POL	WA	WP
Median	29	28	32	24	30	37	31
IQR	3	4	5	3	3	5	5
Sigm	3	3	4	2	3	4	3
SSC	–20	–5	18	7	40	–16	79
UQ	30	30	33	25	32	39	34
LQ	27	26	29	23	29	34	29
UIF	35	35	40	29	37	47	41
UOF	40	40	47	33	42	57	47
LIF	22	21	22	19	24	27	22
LOF	17	15	15	15	19	20	15
Max	33	33	39	28	36	47	40
Min	23	22	26	20	27	28	26
outH	0	0	0	0	0	0	0
outL	0	0	0	0	0	0	0
Зима							
	EA	EU	NAO	PNA	POL	WA	WP
Median	28	30	32	24	31	36	29
IQR	3	4	3	3	4	5	6
Sigm	3	3	2	2	3	4	4
SSC	32	10	10	–52	49	10	47
UQ	30	32	33	26	34	38	31
LQ	27	28	31	23	30	33	26
UIF	34	37	38	30	40	46	40
UOF	38	43	42	34	46	54	48
LIF	23	22	26	18	23	25	18
LOF	18	17	22	14	17	18	9
Max	32	36	37	27	40	41	37
Min	22	25	27	20	26	29	23
outH	1	0	0	0	1	0	0
outL	1	0	0	0	0	0	0

ней синоптической практикой. Тем не менее, временной масштаб 7–45 дней, являющийся наиболее сложным для прогнозирования, требует проведения дополнительных исследований.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ ИНДЕКСОВ ЦИРКУЛЯЦИИ

Оценка практической предсказуемости атмосферных процессов регионального масштаба была выполнена на базе диагностической верификации.

Диагностическая верификация проводилась с использованием четырех основных диаграмм: гистограммы прогнозов (“forecast”) и наблюдений (“reanalysis”) по отдельности, квантильной диаграммы и диаграммы рассеяния. Подсчет количества точек в ячейках разграфленной диаграммы рассеяния приводит к многоходовой таблице сопряженностей, которая, в свою очередь, является приближением искомой двумерной плотности распределения вероятностей пар “forecast” и “reanalysis” – $p(f_i, o_j)$. Полученные диаграммы рассеяния, вместе с маргинальными (безусловными) гистограммами и квантильными графиками, дают общее представление об основных статистических характеристиках индексов и о возможном наличии выбросов.

На рис. 2 в качестве примера приводятся результаты диагностической верификации индекса Восточно-атлантического колебания (EA) для летнего периода и первой недели прогноза. Аналогичные рисунки выполнены для всех других индексов и указанных выше временных интервалов. Как видно, характерной особенностью гистограммы реанализов является близость распределения к нормальному при небольшом сдвиге в сторону отрицательных значений индексов. Данное обстоятельство отражает преобладание в течение рассматриваемого периода в регионе восточная часть Северной Атлантики – Европа зональных процессов над меридиональными. На гистограмме прогнозов при общих сходных чертах, сдвиг в сторону отрицательных значений индекса EA оказывается еще более значительным, что указывает на имеющую место в модельных расчетах зонализацию потока. Квантильный график подтверждает этот сдвиг более отчетливо, а значение ME = –0.09 дает этому факту численную оценку. Диаграмма рассеяния, несмотря на наличие выбросов, демонстрирует определенную степень упорядоченности в расположении точек относительно средней линии, отражающую наличие корреляции. С увеличением заблаговременности прогноза разброс точек вокруг главной диагонали и количество выбросов увеличиваются. Эффект зонализации потока присутствует и в прогнозах других индексов. Наиболее значительные отклонения в сторону усиления зонального переноса (ME = –0.26 и ME = –0.18) отмечаются на западе Атлантического и Тихого океанов (регионы WA и WP – колебаний).

Интегральные меры качества (ME, MAE и RMSE), а также оценки (CC, DT и rval), позволяют сопоставить особенности прогнозов и наблюдений в целом (табл. 2). Оценки ME, MAE и RMSE, полученные на недельном интервале интегрирования во всех случаях свидетельствуют о довольно хорошей общей статистической согласованности временных рядов реанализов и прогнозов индексов на данном временном интервале. Судя по значениям коэффициента детермина-

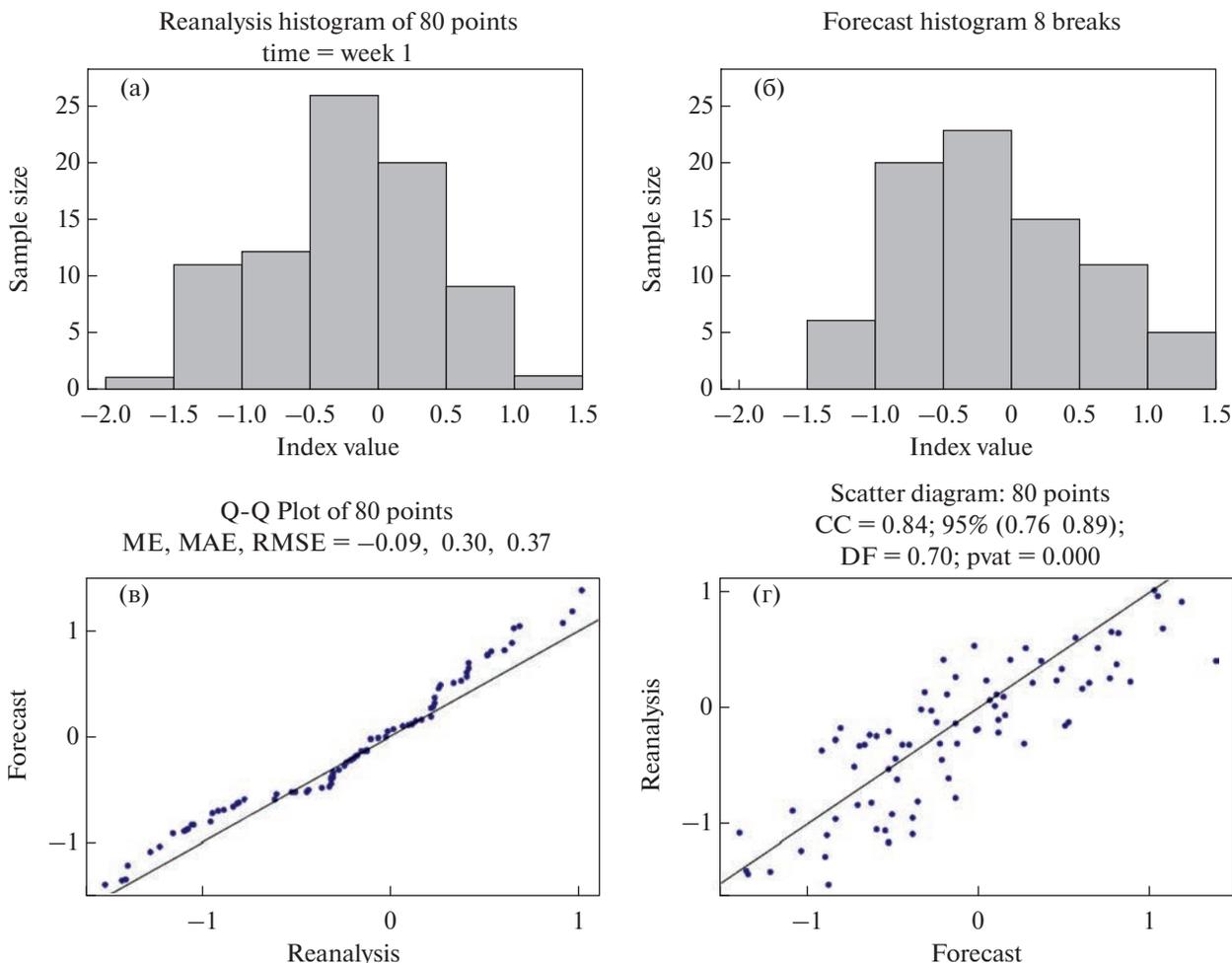


Рис. 2. Диагностика оперативных прогнозов индекса Восточно-атлантического колебания (EA), полученных на базе модели ПЛАВ, на недельном интервале интегрирования для летнего периода (2018–2021 гг., 80 начальных дат): а) гистограмма реанализов; б) гистограмма оперативных прогнозов; в) квантильная диаграмма; г) диаграмма рассеяния.

ции DT, на недельном интервале интегрирования прогнозы большинства индексов объясняют примерно 70–80%, индексы EU и NAO – 80–85% суммарной дисперсии региональной атмосферной изменчивости. И лишь для индексов WA и WP, характеризующих атмосферную циркуляцию соответственно на западе Атлантического и Тихого океанов, значения суммарной дисперсии уменьшаются до 50–60%. За пределами первой прогностической недели качество прогнозов резко падает и не выходит за уровень случайного.

В зимнее время распределение индексов циркуляции в большей степени отличается от нормального, чем в летнее (рис. 3). При этом зимой коэффициенты асимметрии и эксцесса характеризуются заметными отклонениями от нулевых значений. Так как гистограммы строятся по значениям индексов всего интервала, имеющего очевидную внутри-рядовую корреляцию с нерегулярными колебаниями, то в общем виде ап-

роксимирующей кривой эксцесс часто меньше нуля, что может интерпретироваться как слабая двухмодальность, наблюдаемая в функции плотности для гармонического колебания с наложенным шумом. Заметим, что эффект зонализации потока атмосферной моделью не столь четко выражен, как в летнее время.

Интегральные меры качества (ME, MAE и RMSE), а также оценки (CC, DT и pval) (табл. 3) подтверждают наличие полезного сигнала в течение первой прогностической недели. Качество прогнозов индекса PNA по сравнению с летним периодом повышается, – в течение первой прогностической недели доля объясненной дисперсии составляет 88%, второй – 34%. При этом квантильные диаграммы и диаграммы рассеяния демонстрируют хорошую согласованность прогностических и фактических, в том числе аномальных, значений индексов. Таким образом, оценки качества прогнозов хорошо согласуются с

Таблица 2. Сводка основных интегральных характеристик качества прогнозов для 7 индексов атмосферной циркуляции на недельном (Неделя 1) и месячном (Месяц 1) интервалах интегрирования (ME – средняя, MAE – средняя абсолютная и RMSE – средняя квадратическая ошибки, CC – коэффициент корреляции, CC1 и CC2 – нижняя и верхняя границы доверительных интервалов CC, DT – коэффициент детерминации, pval – вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы на согласованность с имеющимися выборочными данными) для летних периодов 2018–2021 гг. (80 случаев)

Индекс	ME	MAE	RMSE	CC	CC1	CC2	DT	pval
Неделя 1								
EA	−0.09	0.30	0.37	0.84	0.76	0.89	0.70	0.01
WA	−0.26	0.46	0.59	0.78	0.67	0.85	0.60	0.01
EU	−0.05	0.27	0.34	0.91	0.87	0.94	0.83	0.01
WP	−0.18	0.44	0.57	0.75	0.63	0.83	0.56	0.01
PNA	0.09	0.26	0.31	0.87	0.81	0.92	0.76	0.01
NAO	−0.01	0.29	0.37	0.92	0.88	0.95	0.85	0.01
POL	0.09	0.30	0.38	0.88	0.81	0.92	0.77	0.01
Месяц 1								
EA	−0.13	0.59	0.73	0.27	0.06	0.47	0.08	0.10
WA	−0.11	0.62	0.87	0.40	0.19	0.57	0.16	0.12
EU	−0.21	0.63	0.77	0.55	0.38	0.69	0.31	0.06
WP	−0.43	0.68	0.91	0.31	0.09	0.49	0.09	0.09
PNA	0.16	0.48	0.60	0.36	0.15	0.53	0.13	0.08
NAO	−0.02	0.78	1.01	0.52	0.34	0.67	0.27	0.04
POL	0.46	0.73	0.93	0.45	0.25	0.61	0.20	0.06

полученными в предыдущем разделе оценками устойчивости, подтверждая значимость региона PNA как источника не только долговременной океанической, но и атмосферной памяти, обеспечивающего увеличение предела предсказуемости региональной атмосферной циркуляции. Несмотря на успешные (с точки зрения коэффициента корреляции) прогнозы индекса NAO в течение первой прогностической недели, модель завышает положительные аномалии геопотенциала в области азорского максимума и недооценивает отрицательные аномалии – в области исландского минимума (ME = −0.10).

5. РЕЖИМЫ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Индексы дальних связей можно использовать для идентификации режимов атмосферной циркуляции. В частности, положительные (отрицательные) значения индекса EA отличаются оппозицией меридиональности (зональность) атмосферной циркуляции для региона Восточная Атлантики и Европа. Разные фазы других индек-

сов могут отличаться только географическим расположением сходных крупномасштабных барических структур. Остановимся на анализе режимов атмосферной циркуляции, соответствующих отрицательной и положительной фазам индексов, выделенных с помощью квартильного анализа [Куликова и др., 2015].

6. ПРОГНОЗЫ

6.1. Детерминистические прогнозы

Идентифицированные с помощью квартильного анализа режимы атмосферной циркуляции можно представить как простые бинарные (дихотомические) да/нет события, а их прогнозы или предупреждения, в свою очередь, как да/нет категориальные прогнозы. При этом итоговые значения прогностических переменных рассчитываются на основе их средних ансамблевых прогнозов. Оценки практической предсказуемости режимов атмосферной циркуляции строятся на основе различных количественных мер качества прогнозов. При всем разнообразии используемых статистик основой для верификации прогнозов бинарных событий (категориальных прогнозов) служат двухходовые таблицы сопряженности прогнозов и наблюдений конкретного явления.

Среди характеристик таблиц сопряженности (табл. 4) различают описательные и содержательные меры качества (descriptive and performance measures) [ForVer, 2012]. Первые представлены “выборочной климатологией”, или “наблюденной частотой явления” (base rate, sample climate), $p = (a + c)/n$, и “прогностической частотой явления” (forecast rate), $f = (a + b)/n$, где $n = a + b + c + d$. Среди содержательных мер далее будут использованы вероятность обнаружения или “доля попаданий” (Hit Rate): $HR = a/(a + c)$; “доля ложных тревог” (False Alarm Ratio): $FAR = b/(a + b)$; коэффициент успеха (Success Ratio), равный доле оправдавшихся прогнозов в общем числе прогнозов явления: $SR = a/(a + b) = 1 - FAR$; индекс смещения частот (Frequency Bias Index): $FBI = (a + b)/(a + c)$, характеризующий соотношение повторяемости прогностических и фактических событий. Наглядным способом анализа таблиц сопряженности является построение характеристических диаграмм (performance diagram), агрегирующих сразу несколько показателей качества прогноза (HR, SR и FBI) [Roebber, 2009].

На рис. 4 представлены характеристические диаграммы (performance diagram) успешности прогнозов положительной и отрицательной фазы индекса EA для летнего периода. Успешность прогнозов на диаграмме, где представлены показатели HR, SR и FBI, тем выше, чем ближе расположение точки к верхнему правому углу квадрата. Как видно (рис. 4а), в течение первой прогности-

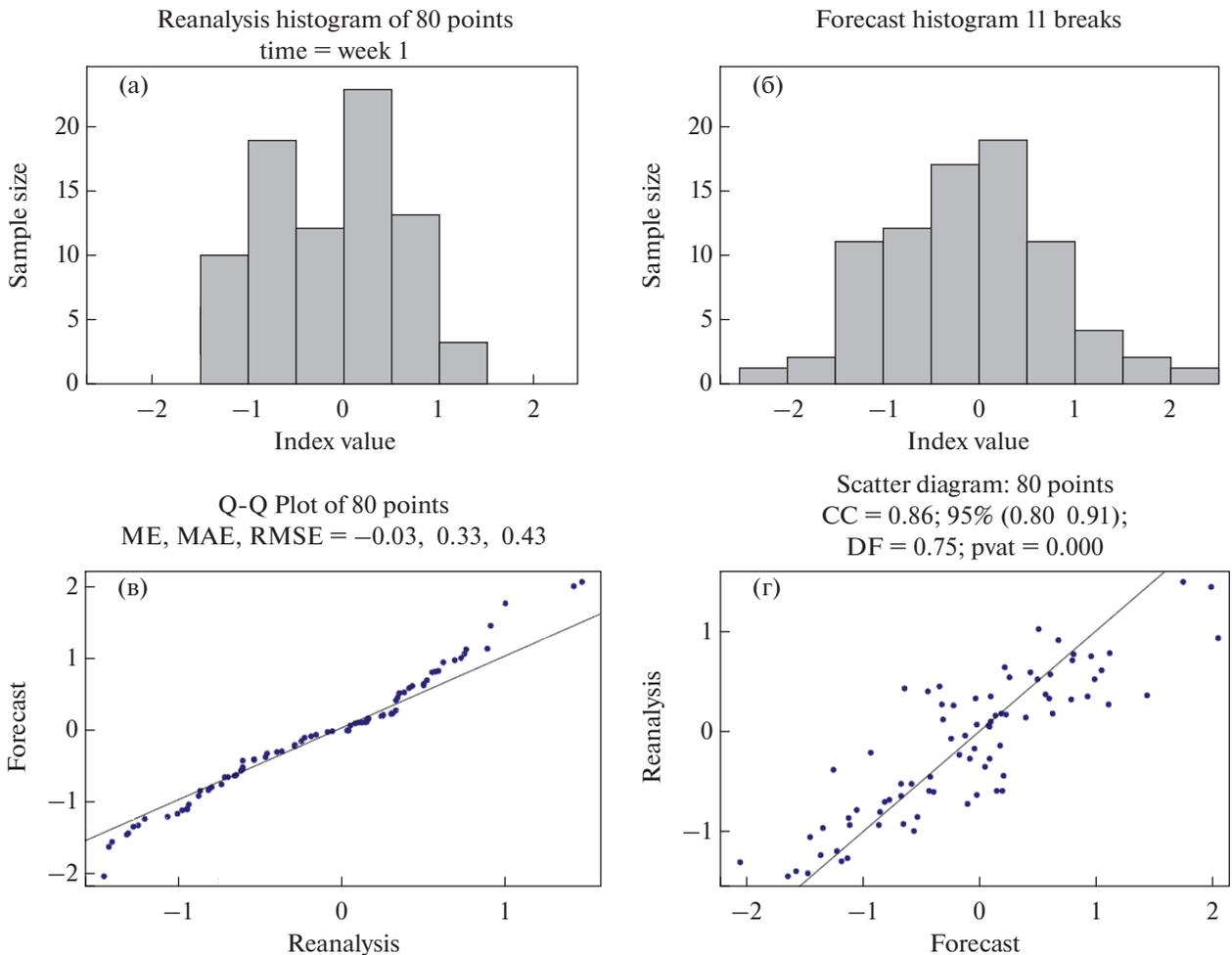


Рис. 3. Диагностика оперативных прогнозов индекса Восточно-атлантического колебания (ЕА), полученных на базе модели ПЛАВ, на недельном интервале интегрирования для зимнего периода (2018–2021 гг., 80 начальных дат): а) гистограмма реанализов; б) гистограмма оперативных прогнозов; в) квантильная диаграмма; г) диаграмма рассеяния.

ческой недели оценки FBI, характеризующие соотношение повторяемости прогностических и фактических событий для положительной фазы моделью ПЛАВ существенно завышаются. Более успешными оказываются прогнозы отрицательной фазы индекса (рис. 4б), связанной с преобладание зональных типов атмосферной циркуляции в регионе Северная Атлантика – Европа.

Характеристические диаграммы, демонстрируя те или иные преимущества в зависимости от временных интервалов интегрирования, отражают вместе с тем зависимость качества прогнозов от повторяемости явления. Для летних периодов 2018–2021 гг. повторяемость отрицательной фазы индекса ЕА, связанной с положительными аномалиями геопотенциала на территории Восточной Европы, почти вдвое превысила повторяемость положительной фазы. Данный эффект был замечен и в других регионах Северного полушария.

Более универсальными, обладающими рядом преимуществ (независимость от частоты явления, невырожденность предела, ограниченность диапазона и т.д.), позволяющими оценивать качество прогноза, в том числе, очень редких событий, являются показатели EDS (Extreme Dependency Score), EDI (Extremal Dependence Index) и их симметризованные варианты SEDS и SEDI. [Ferro, 2012; ForVER, 2012]. Воспользуемся наиболее простым показателем, а именно: индексом экстремальной зависимости EDI, который вместе со стандартным отклонением S выражается следующим образом:

$$EDI = \frac{\lg FAR - \lg HR}{\lg FAR + \lg HR};$$

$$S = \frac{2 \left| \lg FAR + \left(\frac{HR}{1 - HR} \right) \lg HR \right|}{HR (\lg FAR + \lg HR)^2} \sqrt{\frac{HR(1 - HR)}{np}}. \quad (4)$$

Таблица 3. Сводка основных интегральных характеристик качества прогнозов для 7 индексов атмосферной циркуляции на недельном (Неделя 1) и месячном (Месяц 1) интервалах интегрирования (ME – средняя, MAE – средняя абсолютная и RMSE – средняя квадратическая ошибки, CC – коэффициент корреляции, CC1 и CC2 – нижняя и верхняя границы доверительных интервалов CC, DT – коэффициент детерминации, pval – вероятность ошибки при отклонении нулевой гипотезы на согласованность с имеющимися выборочными данными) для зимних периодов 2018–2021 гг. (80 случаев)

Индекс	ME	MAE	RMSE	CC	CC1	CC2	DT	pval
Неделя 1								
EA	0.00	0.27	0.33	0.91	0.87	0.94	0.83	0.01
WA	–0.03	0.33	0.43	0.86	0.80	0.91	0.75	0.01
EU	–0.06	0.32	0.39	0.88	0.82	0.92	0.78	0.01
WP	–0.14	0.32	0.41	0.87	0.80	0.91	0.76	0.01
PNA	0.02	0.23	0.29	0.94	0.91	0.96	0.88	0.01
NAO	–0.10	0.31	0.40	0.89	0.83	0.93	0.79	0.01
POL	–0.05	0.29	0.38	0.89	0.84	0.93	0.80	0.01
Месяц 1								
EA	0.02	0.73	0.85	0.24	0.02	0.44	0.06	0.10
WA	–0.20	0.66	0.82	0.35	0.14	0.53	0.12	0.11
EU	0.05	0.71	0.88	0.43	0.23	0.59	0.19	0.08
WP	–0.15	0.72	0.88	0.26	0.04	0.45	0.07	0.12
PNA	–0.02	0.59	0.73	0.61	0.45	0.73	0.37	0.03
NAO	–0.19	0.65	0.87	0.47	0.28	0.63	0.22	0.06
POL	0.02	0.66	0.81	0.53	0.35	0.67	0.28	0.08

В предположении нормальности распределения стандартные ошибки S , будучи умноженными на 1.96, дают приблизительную оценку 95%-го доверительного интервала [Wilks, 2011].

В табл. 5 в качестве примера приводятся средние значения индексов экстремальной зависимости EDI и соответствующие ошибки прогнозов S , рассчитанные в отдельности для положительной и отрицательной фазы индекса WP для зимнего и летнего периодов. Дополнительной характеристикой служит критерий ETS (Equitable Threat Score), который оценивает успешность прогнозов

по отношению к уровню случайного прогноза: $ETS = (a - ar) / (a + b + c - ar)$, где $ar = (a + b)(a + c) / n$ – ожидаемое при случайном прогнозе значение a . Нулевым значениям ETS соответствует уровень мастерства случайного прогноза. Аналогичные выкладки выполнены и для всех других указанных выше индексов.

Анализ полученных результатов показывает, что за пределами первой прогностической недели независимо от региона качество прогнозов резко ухудшается. В качестве общей тенденции первой недели прогноза можно отметить небольшое повышение качества прогнозов в зимний период по сравнению с летним периодом. Различия между оценками качества прогнозов меридиональных и зональных режимов циркуляции в пределах каждого региона в отдельности не всегда являются статистически значимыми. В то же время можно выявить следующие основные особенности. В летнее время незначительное преимущество имеют прогнозы отрицательной фазы индексов NAO и POL, ассоциирующиеся с режимами блокирования соответственно на территории Западной Европы и Северной Азии. Зимой эффект зонализации потока моделью обеспечивает преимущества в качестве прогнозов режимов зонального переноса, связанных с положительной фазой NAO и POL-колебаний и отрицательной фазой EA и EU-колебаний. В зимний период роль структуры PNA как источника “долговременной памяти” атмосферы повышается, – полезный сигнал отмечается не только в течение первой, но и второй прогностической недели.

И в летний, и в зимний периоды проявляются статистически значимые хорошо выраженные различия в региональной предсказуемости режимов циркуляции, отражающие указанные выше особенности географического распределения внутрисезонной изменчивости (параметра diff). Наибольшие погрешности отмечаются в прогнозах отрицательной фазы индексов WP и WA колебаний. Заметим, что отрицательная фаза WA (WP)-колебаний сопровождается усилением струйного течения и циклонической деятельности на западе Северной Атлантики (северной части Тихого океана) и увеличением степени бароклинной неустойчивости атмосферы.

Таблица 4. Таблица сопряженности для оценки качества прогнозов режимов атмосферной циркуляции

	Явление наблюдалось	Явление не наблюдалось	
Явление прогнозировалось	a (попадания)	b (ложные тревоги)	$a + b$
Явление не прогнозировалось	c (промахи)	d (верные отрицания)	$c + d$
	$a + c$	$b + d$	$n = a + b + c + d$

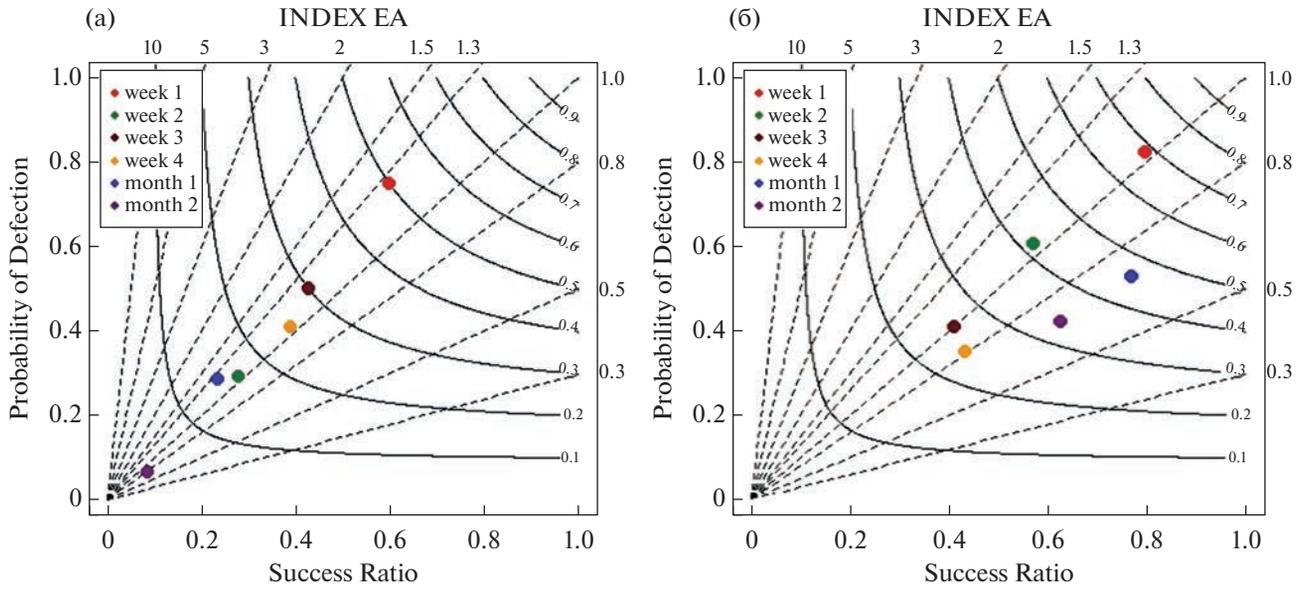


Рис. 4. Характеристические диаграммы успешности оперативных прогнозов индекса Восточно-Атлантического колебания (EA), полученных на базе модели ПЛАВ, для летнего периода (2018–2021 гг., 80 начальных дат): а) положительная фаза, б) отрицательная фаза индекса. Примечание: ось абсцисс – коэффициент успеха SR; ось ординат – доля попаданий HR; пунктирные линии – индекс смещения частот FBI; сплошные кривые – критический индекс успеха CSI.

Таблица 5. Средние (для 80 начальных дат) оценки качества прогнозов режимов атмосферной циркуляции, связанных с положительной и отрицательной фазой индекса WP, а именно: RP – повторяемость фактических (по данным реанализа), FR – прогностических фаз индекса в течение рассматриваемого периода (2018–2021 гг.), объективный индекс успешности (ETS), индекс экстремальной зависимости (EDI), а также соответствующие ошибки (S)

Критерий качества	Период прогноза					
	неделя 1	неделя 2	неделя 3	неделя 4	месяц 1	месяц 2
Лето: WP (положительная фаза)						
RP	0.12	0.14	0.16	0.14	0.12	0.10
FR	0.22	0.26	0.32	0.24	0.20	0.32
ETS(S)	0.28(0.09)	0.04(0.06)	0.10(0.06)	0.02(0.05)	0.19(0.06)	−0.02(0.06)
EDI(S)	0.68(0.06)	0.16(0.27)	0.34(0.29)	0.05(0.25)	0.50(0.21)	−0.15(0.29)
Лето: WP (отрицательная фаза)						
RP	0.57	0.56	0.52	0.52	0.68	0.66
FR	0.46	0.30	0.40	0.41	0.44	0.41
ETS(S)	0.23(0.07)	0.09(0.05)	0.03(0.05)	−0.01(0.14)	0.17(0.06)	−0.04(0.05)
EDI(S)	0.52(0.09)	0.25(0.13)	0.08(0.18)	−0.02(0.18)	0.45(0.12)	−0.14(0.16)
Зима: WP (положительная фаза)						
RP	0.21	0.22	0.20	0.20	0.16	0.16
FR	0.28	0.29	0.22	0.19	0.26	0.22
ETS(S)	0.71(0.06)	0.19(0.08)	0.02(0.04)	−0.04(0.05)	0.02(0.05)	−0.07(0.04)
EDI(S)	0.96(0.01)	0.45(0.21)	0.05(0.20)	−0.13(0.19)	0.08(0.24)	−0.30(0.20)
Зима: WP (отрицательная фаза)						
RP	0.51	0.54	0.54	0.50	0.41	0.42
FR	0.52	0.45	0.46	0.55	0.50	0.49
ETS(S)	0.57(0.09)	0.10(0.06)	−0.04(0.06)	−0.02(0.07)	0.04(0.05)	−0.08(0.05)
EDI(S)	0.86(0.08)	0.25(0.18)	−0.13(0.20)	−0.06(0.25)	0.11(0.25)	−0.25(0.22)

Таблица 6. Оценки качества (площадь под кривой ROC – AROC и pval) оперативных вероятностных прогнозов (80 случаев) атмосферных процессов, связанных с положительной (+) и отрицательной (–) фазами индексов атмосферной циркуляции, полученные на базе 20 членов ансамбля модели ПЛАВ, для летнего и зимнего сезонов

Оценки	EA		WA		EU		WP		PNA		NAO		POL	
	+	–	+	–	+	–	+	–	+	–	+	–	+	–
Лето: неделя 1														
AROC	0.92	0.87	0.84	0.80	0.94	0.89	0.83	0.78	0.83	0.88	0.89	0.95	0.87	0.98
pval	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Лето: месяц 1														
AROC	0.81	0.73	0.70	0.65	0.79	0.75	0.75	0.70	0.77	0.74	0.78	0.73	0.73	0.71
pval	0.02	0.02	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Зима: неделя 1														
AROC	0.89	0.89	0.90	0.85	0.87	0.94	0.90	0.83	0.91	0.95	0.91	0.89	0.98	0.86
pval	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Зима: месяц 1														
AROC	0.81	0.72	0.80	0.60	0.68	0.72	0.67	0.55	0.80	0.77	0.76	0.79	0.76	0.74
pval	0.01	0.05	0.01	0.06	0.01	0.01	0.03	0.23	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

6.2. Вероятностные прогнозы

Для оценки успешности вероятностных прогнозов, полученных на основе прогностических ансамблей (20 членов ансамбля), использовался критерий ROC, который рассчитывался для каждого региона (индекса циркуляции) и временного интервала в отдельности. Для каждой подгруппы, объединяющей прогнозы с вероятностью, превышающей заданное пороговое значение, равное 0.9, 0.8, 0.7, ... 0, составлялись таблицы сопряженности и рассчитывались относительные доли оправдавшихся прогнозов (HR) и ложных тревог (FAR). Интегральной оценкой служила площадь под кривой ROC, построенная в координатах FAR и HR ($0 \leq AROC \leq 1$) при разных уровнях пороговой вероятности разделения событий для принятия решений. При равенстве долей оправдавшихся прогнозов и ложных тревог (отсутствие полезного сигнала) $AROC = 0.5$ (уровень климатического прогноза). Формулы для расчетов и более подробную информацию по данным критериям можно найти в [Муравьев и др., 2000; Standardized Verification, 2002].

В табл. 6 приводятся средние (для 80 начальных дат) оценки AROC и соответствующие значения pval для 7 индексов атмосферной циркуляции и интервалов интегрирования одна неделя и один месяц. Использование вероятностных прогнозов позволяет увеличить временной интервал предсказуемости по сравнению с детерминистическим подходом от одной недели до месяца. При этом в летнее время преимущество на недельном интервале интегрирования осталось за индексами, характеризующие устойчивые режимы циркуляции типа блокирования на территории Северной

Евразии. В зимний период на месячном интервале интегрирования оценки качества прогнозов, связанных с отрицательной фазой индексов WA и WP, представляющих режимы зонального переноса соответственно на западе Северной Атлантики и северной части Тихого океана, приблизились к уровню климатического. Данное обстоятельство свидетельствует, что степень неопределенности долгосрочных прогнозов остается весьма высокой, а “атмосферная память” вплоть до месячного интервала лимитируется неустойчивостью атмосферных процессов, характерной для указанных выше режимов циркуляции.

Таким образом, использование ансамблей прогнозов может улучшить способность прогностической системы к дискриминации событий и обеспечить получение полезной информации на более длительных интервалах времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Региональная атмосферная циркуляция является одним из основных факторов формирования температурного режима и осадков. Количественными характеристиками атмосферных процессов регионального масштаба могут служить индексы дальних связей. С использованием данных индексов с суточным разрешением на базе реанализов ЕЦСПП (ERA5) выполнены оценки внутрисезонной изменчивости/устойчивости атмосферных процессов в различных регионах Северного полушария в летний и зимний сезоны 1991–2020 гг. Показано, что наиболее значительная внутрисезонная изменчивость, как с точки зрения средних, так и экстремальных величин, наблюдается на западе океанов. “Слабая неустойчивость” ха-

рактерна для региона PNA-колебания, обеспечивающего более значительный, по сравнению с другими регионами, резерв атмосферной памяти. Каталогизация временных рядов показателей внутрисезонной изменчивости позволила выделить наиболее “устойчивые” синоптические процессы и годы, с которыми связаны метеорологические экстремумы.

Оценки практической предсказуемости атмосферных процессов рассчитывались на основе оперативной версии глобальной полулагранжевой модели (ПЛАВ) ИВМ РАН и Гидрометцентра России и реанализов ЕЦСПП (ERA5) на недельных и месячных масштабах времени. Отмечается, что за пределами первой прогностической недели качество детерминистических (средних по ансамблю) прогнозов резко падает. Исключением в зимнее время является регион PNA, где информативной оказывается и вторая неделя прогноза. Использование ансамблей и на их основе вероятностных прогнозов позволяет улучшить способность прогностической системы к воспроизведению событий и обеспечить получение полезной информации на месячных интервалах времени.

Устойчивость атмосферных процессов сопоставлялась с их предсказуемостью. Выявлены статистически значимые региональные различия в качестве прогнозов, отражающие географическое распределение оценок устойчивости. Наиболее значительные ошибки прогнозов наблюдаются на западе океанов, — в областях естественным образом связанных с траекториями циклонов. Более успешными в летний период являются прогнозы режимов типа блокирования на территории Северной Евразии. В зимний период роль основного резерва долговременной памяти атмосферы переходит к региону Тихоокеанского-североамериканского колебания (PNA).

Полученные результаты предполагается использовать в оперативной практике внутрисезонного прогнозирования Северо-Евразийского климатического центра.

Оценки предсказуемости атмосферных процессов на основе оперативной версии глобальной полулагранжевой модели (ПЛАВ) и реанализов ЕЦСПП (ERA5) на недельных и месячных масштабах времени выполнены в ФГБУ “Гидрометцентр России” при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения “Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ” (соглашение № 169-15-2023-003 с ФГБУ “Гидрометцентр России” от 01.03.2023).

Исследование дальних связей региональных атмосферных процессов в северном полушарии с использованием климатических индексов выполнен в ИВМ РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00247).

Работа по идентификации аномальных атмосферных процессов регионального масштаба в Северном полушарии выполнена при финансовой поддержке МинОбрНауки РФ (соглашение № 075-15-2021-577 с ИФА им. А.М. Обухова РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Витар Ф., Браунт Э.* Субсезонное-сезонное прогнозирование (ССП): на пути к бесшовному прогнозированию // ВМО. Бюллетень. 2019. Т. 68(1). С. 70–74.
- Дымников В.П.* Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М.: ИВМ РАН, 2007. 283 с.
- Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Куликова И.А.* Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть I. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 5–22.
- Куликова И.А., Круглова Е.Н., Киктев Д.Б.* Крупномасштабные моды атмосферной изменчивости. Часть II. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2015. № 4. С. 5–14.
- Лоренц Э.* Некоторые аспекты предсказуемости поведения атмосферы. / В кн. Долгосрочное и среднесрочное прогнозирование погоды. М.: Мир, 1987. С. 10–32.
- Муравьев А.В., Вильфанд Р.М.* О стандартизации оценок качества прогнозов на средние и долгие сроки // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 24–34.
- Руководство по гидрологической практике. Том I. Гидрология: от измерений до гидрологической информации. ВМО. 2011. № 168. 314 с.
- Толстых М.А., Киктев Д.Б., Зарипов Р.Б., Зайченко М.Ю., Шашкин В.В.* Воспроизведение сезонной атмосферной циркуляции модифицированной полулагранжевой моделью атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 2. С. 149–160.
- Тьюки Д.* Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. М.: Мир, 1981. 690 с.
- Филатов А.Н.* Долгосрочный прогноз погоды и устойчивость и предсказуемость атмосферных процессов / В кн. Шестдесят лет Центру Гидрометеорологических Прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 191–206.
- Уоллес Д., Блэкмон М.* Наблюдаемая низкочастотная изменчивость атмосферы. / В кн. Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере. М.: Мир, 1988. С. 66–109.
- Barnston A., Livezey R.E.* Classification, seasonably and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. 1987. V. 115. P. 1083–1126.
- Dole R.M., Gordon N.D.* Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: geographical distribution and regional persistence characteristics // Mon. Wea. Rev. 1983. V. 111. P. 1567–1586.
- Ferro C.A.T., Stephenson D.B.* Extremal dependence indices: improved verification measures for extreme events and

- warnings // *Weather and Forecasting*. 2012. V. 26. P. 699–713.
- Forecast Verification in Atmospheric Science. A Practitioner's Guide. Second Ed. / Eds. I. Jolliffe, and D. Stephenson. John Wiley & Sons Ltd, 2012. 274 p.
- Frederiksen J.S., Branstator G. Seasonal variability of teleconnection patterns // *J. Atm. Sci.* 2005. V. 62. P. 1346–1365.
- Hersbach, Hans & Bell, Bill & Berrisford, Paul & Hirahara, Shoji & Horányi, András & Muñoz Sabater, Joaquín & Nicolas, Julien & Peubey, Carole & Radu, Raluca & Schepers, Dinand & Simmons, Adrian & Soci, Cornel & Abdalla, Saleh & Abellan, Xavier & Balsamo, Gianpaolo & Bechtold, Peter & Biavati, Gionata & Bidlot, Jean & Bonavita, Massimo & Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. P. 1999–2049.
- Horel J.D. A Rotated Principal Component Analysis of the Interannual Variability of the Northern Hemisphere 500 mb Height Field // *Mon. Wea. Rev.* 1981. V. 109. P. 2080–2092.
- Lau N.C. A diagnostic study of recurrent meteorological anomalies appearing in a 15-year simulation with a GFDL GCM // *Mon. Wea. Rev.* 1981. V. 109. P. 2287–2311.
- Murphy A.H. Assessing the economic value of weather forecasts: An overview of methods, results and issues // *Meteor. Appl.* 1994. V. 1. P. 69–73.
- Murphy A.H., Huang J. On the quality of CAC's probabilistic 30-day and 90-day forecasts // *Amer. Meteor. Soc.* 1991. P. 390–399.
- Murphy A.H., Winkler R.L. A general framework for forecast verification // *Mon. Wea. Rev.* 1987. V. 115. P. 1330–1338.
- Richman M.B. Rotation of principal components // *J. Climatol.* 1986. V. 6. P. 293–335.
- Roebber P.J. Visualizing multiple measures of forecast quality // *Wea. Forecasting*. 2009. V. 24. P. 601–608.
- Seo K.-H., Lee H.-J., Frierson D.M.W. Unraveling the teleconnection mechanisms that induce wintertime temperature anomalies over the Northern Hemisphere continents in response to the MJO // *J. Atm. Sci.* 2016. V. 73. P. 3557–3571.
- Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF) // New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-No. 485). 2002. V. I.
- Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter // *Monthly Weather Review*. 1981. V. 109. P. 784–812.
- Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 3d ed. London: Academic Press, 2011. 676 p.
- Wilks D.S. Diagnostic Verification of the Climate Prediction Center Long-Lead Outlooks, 1995–98 // *J. Climate*. 2000. V. 13. Is. 13. P. 2389–2403.
- Wilks D.S. Forecast value: Prescriptive decision studies. Economic Value of Weather and Climate Forecasts / Eds. R.W. Katz and A.H. Murphy. Cambridge University Press. 1997. P. 109–145.
- Younas W., Tang Y. PNA Predictability at Various Time Scale // *J. Climate*. 2013. V. 26. P. 9090–9114.

An Analysis of Intra-Seasonal Variability and Predictability of Atmospheric Processes of Regional Scale in the Northern Hemisphere Mid-Latitudes

R. M. Vilfand^{1, *}, I. A. Kulikova^{1, **}, V. M. Khan^{1, 2, 3, ****}, and M. E. Makarova^{1, ***}

¹Hydrometeorological Center of Russia, Bolshoy Predtechensky lane, 13, building 1, Moscow, 123376 Russia

²Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 3, Moscow, 119017 Russia

³Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Gubkin St., 8, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: romanvilfand@mail.ru

**e-mail: i.kulikova2009@yandex.ru

***e-mail: m_makarova@mail.ru

****e-mail: khan@mecom.ru

The issues related to the intra-seasonal variability and predictability of the atmospheric processes of a regional scale in the Northern Hemisphere are considered. To identify the latter, the circulation indices characterizing the large-scale modes of the atmospheric variability are used. An assessment of the regional intra-seasonal variability of the atmospheric processes in the summer and winter seasons of 1991–2020 is given. A study of the practical predictability of the regional atmospheric processes is carried out using the global semi-Lagrangian model developed at the INM RAS jointly with the Hydrometeorological Center of Russia, as well as the reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts on a weekly and monthly time scales. It is concluded that beyond of the first forecast week, the quality of deterministic (ensemble mean) forecasts drops sharply. In winter, the exception is the Pacific–North American oscillation region, where a useful signal is traced not only for the first prognostic week, but also for the second one. The use of the probabilistic forecasts makes it possible to increase the time interval of predictability compared to the deterministic approach from one week to a month. The biggest errors are noted in the forecasts of the circulation regimes in the west of the North Atlantic and in the west of the northern part of the Pacific, in the regions of the most significant intra-seasonal variability. The obtained results are supposed to be used in the operational practice of the intra-seasonal forecasting of the North Eurasian Climate Center (NEACC).

Keywords: circulation indices, atmospheric variability modes, predictability, intra-seasonal forecasts