

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

DOI:10.21513/2410-8758-2025-4-467-505

УДК 551.509.313

Сезонное климатическое прогнозирование: от научных основ к практическим решениям

В.М. Хан^{1), 2)}, Р.М. Вильфанод¹⁾*

¹⁾ Гидрометцентр России,
Россия, 123376, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, с. 1

²⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

*Адрес для переписки: *khan@mecom.ru*

Реферат. Представлен обзор методов сезонного климатического прогнозирования. Прослежена эволюция прогностических методов – от ранних эмпирико-статистических подходов, основанных на выявлении устойчивых связей в климатической системе, до современных сложных динамических и динамико-статистических моделей, включая методы искусственного интеллекта. Особое внимание уделяется роли ключевых климатических процессов, таких как Эль-Ниньо – Южное колебание, колебание Маддена–Джулиана, состояние влажности почвы и арктических морских льдов, как основных источников предсказуемости на сезонных масштабах. Рассмотрена концепция «окон возможностей» – периодов, когда влияние этих факторов на региональную циркуляцию максимально, что позволяет повысить точность прогнозов. Описаны компоненты современной системы сезонного прогнозирования, включая генерацию ансамблей оперативных и ретроспективных прогнозов, использование мультимодельных подходов для оценки и снижения неопределенности, а также методы верификации. Освещена инфраструктура Всемирной метеорологической организации, в частности, роль глобальных центров долгосрочных прогнозов и региональных климатических центров, таких как Северо-Евразийский климатический центр, в адаптации глобальных прогностических продуктов к региональным условиям. Отдельно обсуждаются вопросы разработки специализированных прогностических продуктов для ключевых секторов экономики, а также перспективные направления развития, включая прогнозирование на основе воздействий (*impact-based forecasting*).

Ключевые слова. Сезонное прогнозирование, климатические модели, Эль-Ниньо, источники предсказуемости, окна возможностей, мультимодельные прогнозы, Северо-Евразийский климатический центр, верификация прогнозов, прогнозирование на основе воздействий.

Seasonal climate forecasting: from scientific foundations to practical solutions

V.M. Khan^{1), 2)}, R.M. Vilfand¹⁾*

¹⁾ Hydrometcentre of Russia,
13, b.1, Bolshoy Predtechensky lane, 123376, Moscow, Russian Federation

²⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
13, Pyzhevsky lane, 19017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *khan@mecom.ru*

Abstract. This article provides a review of methods of seasonal climate forecasting. The evolution of forecasting techniques is traced – from early empirical-statistical approaches, based on identifying stable relationships within the climate system, to modern complex dynamic and hybrid models, including artificial intelligence methods. Special emphasis is placed on the role of key climate processes, such as El Niño–Southern Oscillation (ENSO), the Madden–Julian Oscillation, the state of the soil moisture, and Arctic sea ice, as primary sources of predictability on seasonal timescales. The concept of "windows of opportunity" – periods when the influence of these factors on regional circulation is maximized, thereby enhancing forecast accuracy – is considered. The components of a modern seasonal forecasting system are described, including the generation of ensembles of operational and retrospective (hindcast) forecasts, the use of multi-model approaches to assess and reduce uncertainty, and methods for objective verification. The infrastructure of the World Meteorological Organization is outlined, particularly the role of Global Producing Centres and Regional Climate Centres, such as the North Eurasian Climate Centre, in adapting global forecast products to regional and national conditions. The development of specialized forecast products for key economic sectors is discussed separately. Promising development directions, including impact-based forecasting, are also examined.

Keywords. Seasonal forecasting, climate models, ENSO, sources of predictability, windows of opportunity, multi-model forecasts, North Eurasian Climate Centre, forecast verification, impact-based forecasting.

Введение

Сезонные прогнозы стали неотъемлемой частью современной климатической науки и представляют ценную практическую информацию для управления адаптационными мерами в условиях изменяющегося климата и участившихся экстремальных погодных явлений (Gettelman et al., 2023; Hewitt, Moufouma-Okia, 2023). Их развитие стало возможным благодаря значительному прогрессу в системах сбора информации, развитии климатического моделирования, более глубоком понимании физических процессов климатической системы и совершенствовании вычислительных технологий (Doblas-Reyes et al., 2013; Vitart et al., 2017).

Истоки сезонного прогнозирования относятся к концу XIX века, когда, в ответ на разрушительный голод в Индии, были предприняты первые попытки оценки муссонных осадков на предстоящий сезон. Эти ранние методы долгосрочных прогнозов в большинстве случаев основывались на выявлении корреляционных зависимостей между различными климатическими параметрами (например, снежный покров в Гималаях и количество осадков на равнинных территориях).

Научный прорыв в исследуемой области ознаменовался работами Гилберта Уокера (Walker, 1923, 1924). В начале XX века, в 1923 и 1924 годах, Уокер внедрил и усовершенствовал статистические методы анализа гидрометеорологических данных, благодаря которым удалось выявить ключевые климатические явления, включая Южное колебание. Развитие численного прогноза погоды, начатое в 1950-х годах (Charney et al., 1950), заложило основу для динамического прогнозирования метеорологических условий различной заблаговременности. Ключевым прорывом стало углубление понимания связи между океаном и атмосферой, во многом благодаря работам Яакоба Бьеркнеса (Bjerknes, 1969). Обнаруженная им тесная взаимосвязь между Южным колебанием и явлением Эль-Ниньо впоследствии привела к формированию целостной концепции ЭНЮК (Эль-Ниньо – Южное колебание). Данная концепция, подтвержденная и развитая в дальнейших исследованиях (McPhaden et al., 1998; Philander, 1986; Rasmusson, Carpenter, 1982), продолжает считаться одним из важнейших факторов глобальной климатической предсказуемости.

Гидрометцентр России и Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Войкова на протяжении десятилетий являются ведущими научными организациями Росгидромета в области изучения погоды и климата, играя ключевую роль в развитии методов сезонного прогнозирования в стране. Исторически становление этих методов опиралось на несколько научных школ. Основы были заложены выдающимися учёными Б.П. Мультановским и С.Т. Пагавой (Пагава и др., 1966), предложившими новые подходы к макросиноптическому анализу. Важный вклад внесли Г.Я. Вангенгейм (1952) и А.А. Гирс (1974), разработавшие макроциркуляционный метод долгосрочного прогноза на основе классификации крупномасштабных атмосферных процессов. Параллельно формировалось синоптико-статистическое направление, основоположниками которого выступили Н.А. Багров, Д.А. Педь (Багров и др., 1985), М.И. Юдин, А.В. Мещерская, Ш.А. Мусаелян, А.И. Угрюмов (2006), Р.М. Вильфанд и др. (Батырева и др., 1995). Их последователи значительно углубили понимание статистических закономерностей региональных атмосферных процессов. Вероятностные методы были выведены на новый уровень трудами Г. В. Грузы и Э.Я. Раньковой (1981). Их вклад заключался не только в разработке новых прогностических подходов, но и в создании формализованной системы оценки их эффективности.

Зарождение динамического направления в метеорологии было положено фундаментальными работами А.А. Фридмана в начале XX века. Значительный прорыв в его развитии осуществил И. А. Кибель, предложивший методо-

логию, основанную на гипотезе геострофичности. Этот формализм позволил адаптировать уравнения гидротермодинамики для задач прогноза погоды и заложить теоретический фундамент для перехода к более сложным негеострофическим моделям. Принципиальный прорыв произошёл в конце 1950-х годов, когда Е.Н. Блинова разработала первую полную теоретическую модель общей циркуляции атмосферы, доказав возможность долгосрочного прогнозирования гидродинамическими методами (Блинова, 1976). Этот успех стал отправной точкой для исследований С.Л. Белоусова, А. Л. Каца и других учёных. Особое место в развитии динамических методов занимают работы В.П. Дымникова, В.Н. Лыкосова (Дымников и др., 2022), Е.М. Володина (2017), В.П. Мелешко (Мирвис, Мелешко, 2008, 2020), М.А. Толстых и др. (Толстых и др., 2015, 2017). Их исследования позволили принципиально усовершенствовать и развить современные прогностические модели.

Методы сезонного прогнозирования можно разделить на три основные категории. Эмпирические (синоптико-статистические) методы, основанные на корреляциях между различными климатическими параметрами на исторических данных предикторов и предиктантов (например, Багров и др., 1985; Угрюмов, 2006, Батырева и др., 1995), остающимися популярными до настоящего времени благодаря своей относительной простоте и низким вычислительным требованиям. Однако они имеют существенные ограничения, особенно при работе с нелинейными процессами и новыми климатическими режимами на фоне происходящих климатических изменений. Динамические методы, использующие сложные численные модели климатической системы, позволяют учитывать взаимодействие между атмосферой, океаном и другими компонентами системы через систему физико-математических уравнений (например, Мирвис, Мелешко, 2008, 2020; Толстых и др., 2015, 2017; Володин, 2017). Третье направление – динамико-статистические подходы, сочетающие преимущества первых двух методов посредством статистической интерпретации выходных данных динамических моделей (например, Вильфанд и др., 2010, 2017, 2024; Хан и др., 2011).

В рамках деятельности Гидрометцентра России/Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ), в ходе работы создаются и внедряются в оперативную практику динамические (Киктев и др., 2015; Толстых и др., 2015, 2017; Фадеев и др., 2021), статистические и комбинированные гидродинамико-статистические методы (Муравьев и др., 1999; Вильфанд и др., 2017; Хан и др., 2011), позволяющие выпускать прогнозы на сроки от месяца и более.

Благодаря этому наследию и постоянному развитию методологий климатического прогнозирования, Гидрометцентр России/Северо-Евразийский климатический центр сохраняет позиции на мировом уровне ВМО (Всемирная метеорологическая организация) в качестве глобального центра по долгосрочным прогнозам (ГЦДП) и регионального климатического центра (РКЦ) (Крыжков, 2012; Киктев и др., 2015).

Одной из основных проблем сезонного прогнозирования остается ограниченная предсказуемость, обусловленная хаотичностью атмосферных про-

цессов (Anderson, 2008; Hoskins, Schopf, 2008; Крыжов, 2012; Вильфанд и соавт., 2010, 2017; Цепелев, Хан, 2015, Киктев, Куликова, Круглова, 2015а,б). Для учета этой неопределенности используются ансамблевые прогнозы, в основе которых заложен многократный прогон модели с небольшими вариациями начальных условий. Разброс между отдельными членами ансамбля дает оценку вероятности различных сценариев развития климатической ситуации (Anderson, 2008; Hoskins, Schopf, 2008).

В последние годы бурное развитие получили методы машинного обучения и нейронных сетей в методах метеорологического кратко- и среднесрочного прогнозирования (Bi et al., 2023; Chen et al., 2024; de Burgh-Day, Leeuwenburg, 2023). Интеграция методов искусственного интеллекта в прогнозистические схемы способствует улучшению качества и детализации прогнозов. Новые технологии позволяют моделям учитывать большее количество переменных и лучше справляться с неопределенностью прогнозов. Исследование Кента и его коллег (Kent et al., 2025) показало, что модель машинного обучения ACE2, изначально созданная для краткосрочных прогнозов, успешно конкурирует с ведущими климатическими динамическими моделями в задаче сезонного прогнозирования. Показано, что ACE2, будучи обученной исключительно на данных реанализа ERA5 и используя простые граничные условия – инерционные аномалии температуры поверхности океана, демонстрирует успешность, сопоставимую с ведущей динамической моделью Метофиса GloSea. Модель не только успешно воспроизводит влияние на глобальную циркуляцию основного источника сезонной предсказуемости – Эль-Ниньо, но и демонстрирует статистически значимый сигнал в прогнозировании Северо-Атлантического колебания (САК). Перспективы моделей машинного обучения типа ACE2 связаны с их высокой вычислительной эффективностью. Это не только открывает возможность создания сверхбольших ансамблей для успешной оценки вероятности рисков экстремальных явлений, но и сулит прорыв в прогнозировании климата за счёт синергии с традиционными динамическими моделями и наверняка приведёт к созданию более продвинутых гибридных систем (Chen et al., 2024; de Burgh-Day, Leeuwenburg, 2023).

Источники предсказуемости на сезонных интервалах времени

Методы прогнозирования на базе моделей общей циркуляции атмосферы часто оказываются неэффективными на сезонных и более масштабах времени из-за принципиально иных физических механизмов предсказуемости. В отличие от краткосрочных прогнозов, где качество прогнозов во многом определяется начальными условиями, климатические прогнозы требуют учёта медленно меняющихся компонентов системы, таких как температура поверхности океана (например, Полонский, 2001), состояние деятельного слоя суши, криосферы, океанических течений, стратосферных и вулканических явлений (Maher et al., 2015; Shindell et al., 2003), и других низкочастотных взаимодействий между сушей, океаном и атмосферой.

Значительный прорыв в понимании механизмов сезонной предсказуемости произошел в 1970-х годах с открытием тесной связи между Южным колебанием и феноменом Эль-Ниньо (Bjerknes, 1969). Было установлено, что эти явления представляют собой единую систему, проявляющуюся через тесную связь между океаном и атмосферой в тропической зоне Тихого океана (McPhaden et al., 1998; Philander, 1986; Rasmusson, Carpenter, 1982). Данное открытие продемонстрировало, что аномалии температуры поверхности океана в тропической зоне способны оказывать влияние на климат в удаленных регионах на сезонных масштабах (Давыдов, Полонский, 1996; Полосин, 1975; Полонский, Башарин, 2002; Дианский, 2023). Мощный эпизод Эль-Ниньо 1982-83 гг. с его глобальными атмосферными телесвязями вывел это явление на первый план в мировой климатологии (Воскресенская и др., 1992; Harrison et al., 2008; Vitart et al., 2003; Wirthy et al., 1976). С этого момента начала формироваться новая «индустрия» сезонного прогнозирования от физических основ до практического использования, включая политические аспекты (Harrison et al., 2008; Jansen et al., 2009).

Несмотря на прогресс, многие фундаментальные вопросы, связанные с ЭНЮК, остаются открытыми. Хотя основные физические механизмы в целом поняты и описаны теоретическими моделями (например, затухающий осциллятор и осциллятор перезарядки), до сих пор не ясно, что именно определяет зарождение Эль-Ниньо (Burgers et al., 2005; Jin et al., 2008; Suarez, Schopf, 1988; Wang, 2001). Доказано, что предвестниками являются положительная аномалия теплосодержания в западной части Тихого океана и эпизоды западных ветров (Gebbie et al., 2007; Tan et al., 2019), порождающие волны Кельвина, которые переносят энергию на восток. Однако сохраняется фундаментальная неопределенность, какая комбинация условий приводит к развитию полномасштабного Эль-Ниньо. Также остаются нерешенными вопросы о периодичности явления, его взаимодействии с годовым циклом, а также о причинах разнообразия сценариев развития эпизодов Эль-Ниньо и Ла-Ниньи.

Российские исследования последних лет (Железнова и Гущина, 2015; Гущина, Калиновская, Матвеева, 2020; Осипова и Гущина, 2021) вносят вклад в комплексную картину механизмов формирования двух типов Эль-Ниньо. Авторами проанализированы различия в динамике океанических процессов, ответственных за рост аномалий ТПО при каноническом Эль-Ниньо и Эль-Ниньо Модоки. Показано, что их эволюция и интенсивность модулируются низкочастотной (десятилетней) изменчивостью в Тихом океане и тесно связаны с внутрисезонной активностью тропической конвекции (Железнова и др., 2024). Однако климатические модели с трудом адекватно воспроизводят эти связи. Работа (Matveeva et al., 2018) продемонстрировала, что лишь ограниченное число моделей проекта CMIP5 способно реалистично воспроизвести одновременно оба типа Эль-Ниньо и ключевые характеристики тропической внутрисезонной изменчивости.

Оперативное прогнозирование ЭНЮК является важнейшей практической задачей (Luo et al., 2008). На сегодняшний день существует отлаженная

международная система мониторинга и прогноза, координируемая ВМО и ведущими центрами, такими как Национальный центр прогнозирования окружающей среды США (NCEP/NOAA) и Международный исследовательский институт климата и общества (IRI). Регулярно публикуемые на сайте ВМО бюллетени под названием "El Niño/La Niña Update" служат основным международным инструментом, обеспечивающим пользователей надежной и своевременной информацией о состоянии и ожидаемой эволюции ЭНЮК на основе консенсус-прогнозов по ансамблю из нескольких десятков динамических и статистических моделей. Предшественником "El Niño/La Niña Update" можно считать бюллетень "Climate Diagnostic Bulletin", который выпускается Национальным центром прогнозирования окружающей среды США (NCEP/NOAA) более 20 лет.

Оценка прогностического потенциала российской модели INM-CM5 демонстрирует её конкурентоспособность в прогнозах ЭНЮК (Реснянский и др., 2024). Прогнозы аномалий ТПО в области NINO3-4 характеризуются высокими значениями коэффициента корреляции (0.9-0.75) для заблаговременностей 2-6 месяцев, которые снижаются до 0.6-0.4 для 7-8 месяцев. Такие показатели соответствуют уровню ведущих мировых моделей.

Цикл работ Лубкова и др. (2017, 2020) представляет альтернативный подход с использованием гибридной модели на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), обеспечивающей прогноз с заблаговременностью до 21-22 месяцев.

Однако ЭНЮК – не единственный источник сезонной предсказуемости (Frankignoul, Senechael, 2007). Тропические зоны Индийского и Атлантического океанов (Зеленько и др., 1983), также генерируют предсказуемые сигналы (Schott et al., 2009; Wu et al., 2007). При этом ключевая проблема заключается в том, что предсказуемость на этих масштабах носит фрагментарный характер (например, Воробьева, Володин, 2020; Муравьев и др., 1999 а, б; Тищенко и др., 2019) – она существенно усиливается в определённые периоды и в определённых регионах, когда в климатической системе возникают особые благоприятные условия, получившие название «окон возможностей» (Mariotti et al., 2020).

В формировании погодно-климатических условий средних широт ключевую роль играет крупномасштабная атмосферная циркуляция (например, Киктев и др., 2015а, б), модулируемая такими факторами, как блокирующие антициклоны, САК, Арктическое колебание (АК) и др. В ряде работ (например, Hurrell et al., 2003; Lamb, Peppler, 1987) показано, что отрицательная фаза САК создаёт условия для повышенной предсказуемости. Исследование Бардина (2015) частично объясняет наблюдаемую в прошлом смену знака тренда зимних температур на территории России совместным влиянием глобального потепления и естественной изменчивости, связанной с ключевыми атмосферными модами, такими как САК, Восточно-Атлантическая мода (ВАМ), Скандинавская мода (СКА) и Восточно-Атлантическая/Западно-Российская мода (ВА/ЗР). Эти моды либо усиливали, либо ослабляли фоновое глобальное потепление в различных регионах России.

Особое значение при анализе масштабных экстремальных явлений уделяется квазистационарным волнам Россби. Нарушая зональную циркуляцию, они могут вызывать волны жары с тяжёлыми последствиями, как это было в Европе и России в 2003 и 2010 гг. (Schubert et al., 2011), или приводить к затяжным засухам или наводнениям (Киктев и др., 2015).

В тропиках, наряду с Эль-Ниньо, важнейшим источником предсказуемости выступает колебание Маддена-Джулиана (КМЖ). Оно связано с перемещением зон интенсивной конвекции с периодом 30-60 дней и оказывает существенное влияние на погодные условия в Северной Америке, Австралии и Азии. Современные модели демонстрируют прогресс в прогнозировании КМЖ с заблаговременностью до 30 дней, хотя точность прогноза сильно зависит от фазы колебания (Cassou, 2008). В работе Куликовой и соавт. (2023) рассматривается влияние КМЖ на атмосферные процессы в умеренных широтах Северного полушария. На основе дисперсионного анализа авторы делают вывод о существовании дальних связей между погодными режимами в тропиках и в умеренных широтах с заблаговременностью около 5-7 суток, наиболее чётко выраженных в Тихоокеанско-Североамериканском регионе и Азии. При этом влияние КМЖ на циркуляцию в Атлантико-Европейском секторе носит сложный характер и требует учёта дополнительных факторов, таких как стратосферная циркуляция и явление Эль-Ниньо.

Дополнительные возможности для прогнозирования открывают стратосферные процессы, в частности, внезапные стратосферные потепления (ВСП) и квазидвухлетнее колебание (КДК). ВСП способны спровоцировать экстремальные похолодания в Евразии и Северной Америке с откликом в несколько недель, тогда как КДК модулирует влияние МJO, формируя сложные каскады климатических взаимодействий (Baggett et al., 2017). В исследовании Варгина и соавт. (2024) успешность ансамблевых сезонных прогнозов модели ИВМ РАН оценивалась по способности воспроизвести скорость зонального ветра в арктической стратосфере. Результаты показали, что наиболее холодные зимние сезоны (2010/2011 и 2019/2020 гг.), характеризовавшиеся устойчивым и холодным полярным вихрем, прогнозируются значительно лучше, чем сезоны с его ослаблением в результате ВСП (Сумерова и др., 2023).

Значимым источником предсказуемости являются также процессы взаимодействия сушки и атмосферы. Аномалии почвенной влаги и снежного покрова влияют на температурный режим и атмосферную циркуляцию, потенциально усиливая засушливые условия и волны жары. Тем не менее, точные механизмы этих связей требуют дальнейшего углублённого изучения. (Guo et al., 2011; Hsu, Dirmeyer, 2021).

Морской лёд выступает важным компонентом климатической системы (например, Семенов и др., 2023; Kim et al., 2025). Его присутствие ограничивает потоки тепла и влаги на границе океан-атмосфера, формирует резервуар пресной воды и благодаря высокому альбедо регулирует поступление солнечной радиации. Через механизмы связи с атмосферой состояние морского льда влияет на траектории штормов и океаническую циркуляцию. В последние

годы активно исследуется степень влияния аномалий морского льда в Арктике на погодные условия в средних широтах. Один из предполагаемых сценариев показывает, что в периоды аномально высокой температуры арктической поверхности вторжения холодного арктического воздуха в средние широты могут становиться более продолжительными из-за ослабления меридиональных градиентов температуры и изменения характеристик струйного течения и циклонической активности (Семенов и др., 2017). Однако сложность и многофакторность процессов, влияющих на струйные течения, затрудняет получение однозначных доказательств этой связи, а сами механизмы пока ещё недостаточно адекватно воспроизводятся современными климатическими моделями.

Практическое использование «окон возможностей» в прогнозировании требует применения инновационных подходов. Поскольку динамические модели не всегда адекватно воспроизводят ключевые физические процессы, широкое распространение получают статистические и гибридные методы, которые используются в дополнение к динамическим. Результаты исследований показывают, что комбинация таких предикторов, как индексы ЭНЮК и КМЖ (Luo et al., 2016), позволяет значительно улучшить прогнозы температуры и осадков в ряде регионов с заблаговременностью до 3-4 недель.

Особенно перспективным это направление является в области прогнозирования экстремальных явлений. Например, эмпирические модели, учитывающие фазы КМЖ и КДК, уже сегодня позволяют прогнозировать условия, благоприятные для формирования атмосферных рек на западном побережье США, с заблаговременностью до 5 недель. Анализ циркуляционных режимов, в свою очередь, помогает уточнить оценку рисков волн жары и засух за несколько недель до их наступления.

Яркой иллюстрацией комплексного подхода к прогнозированию служит исследование Dunstone et al. (2023), посвящённое анализу причин катастрофических наводнений в Пакистане в 2022 году. Авторы выявили, что это событие было вызвано уникальным сочетанием нескольких факторов: аномально интенсивных муссонных осадков, усиленных феноменом Ла-Нинья, экстремального таяния ледников из-за предшествующих волн тепла и длительного переувлажнения почвы. В данном контексте авторы выделяют два ключевых прогностических горизонта: сезонный (1-3 месяца), на котором возможен прогноз фоновых аномалий осадков на основе состояния океана, и субсезонный (2-4 недели), позволяющий прогнозировать конкретные экстремальные явления. Так, в сезонных прогнозах модели UK GloSeab сигнал о повышенной вероятности экстремальных осадков в регионе был отчётливо виден уже за два месяца до пика наводнения. Важным выводом работы является подтверждение значительной роли антропогенного изменения климата, которое увеличило влагоёмкость атмосферы и интенсифицировало таяние ледников, тем самым усугубив масштабы катастрофы.

Компоненты системы сезонного прогнозирования

Современная система сезонного прогнозирования представляет собой технологически сложный конвейер, обеспечивающий генерацию, обработку и распространение климатических прогнозов (Куликова и др., 2024а,б). Её методологический фундамент базируется на двух взаимодополняющих компонентах, связанных с расчетом оперативных и ретроспективных прогнозов. Оперативное прогнозирование реализуется посредством инициализации глобальных климатических моделей данными наблюдений через системы усвоения разнородных типов данных. Данный процесс характеризуется высокой вычислительной емкостью и опирается на глобальную инфраструктуру обмена метеорологической информацией, координируемую Всемирной метеорологической организацией. Используя в качестве начальных условий данные реанализов за прошлые периоды, ретроспективное прогнозирование выполняет две методологически важные функции: верификацию прогностической системы через сравнение с архивом наблюдений и создание эмпирической базы для калибровки оперативных прогнозов и устранения систематических ошибок моделей. Для обеспечения репрезентативности выборки, охватывающей различные климатические режимы, рекомендуемый временной горизонт ретроспективных экспериментов составляет не менее 30 лет. Ключевое значение при анализе ретроспективных прогнозов придается методам кросс-валидации, которые минимизируют риск переобучения модели и обеспечивают статистически объективную оценку её прогностического потенциала.

Одним из наиболее эффективных подходов в современной практике стало использование мультимодельных ансамблей. Комбинирование прогнозов от нескольких независимых моделей позволяет повысить надёжность и снизить влияние систематических ошибок, присущих каждой из них в отдельности (Doblas-Reyes et al., 2013; Vitart et al., 2017; Kirtman et al., 2014). Показательно, что простое усреднение результатов зачастую оказывается более эффективным, чем сложное взвешивание моделей (Крыжов, 2012; Brajard et al., 2023), особенно при ограниченной длине рядов ретроспективных данных.

Современный этап развития систем сезонного прогнозирования характеризуется переходом к созданию специализированных продуктов, адаптированных к отраслевым потребностям. Данное направление предполагает разработку прогнозов не только стандартных метеорологических параметров, но и специализированных величин, включая, например, частоту и интенсивность экстремальных гидрометеорологических явлений, повторяемость дней с превышением пороговых значений параметров, даты наступления агроклиматических сезонов, расчет специализированных индексов (засушливости, пожароопасности) и прочее. Особую практическую значимость в сельскохозяйственном секторе приобретают прогнозы, ориентированные на биоклиматические показатели – пороговые суммы осадков за вегетационный период и эффективные температуры, определяющие фенологическое развитие конкретных сельскохозяйственных культур.

Зачастую потребители нуждаются в более подробной прогностической информации. Методологической основой пространственной детализации прогнозов выступают технологии даунскейлинга, реализуемые через два взаимодополняющих подхода. Статистический даунскейлинг, основанный на установлении устойчивых связей между крупномасштабными предикторами и локальными климатическими характеристиками (Вильфанд и др., 2024, Тищенко и др., 2016) сохраняет широкую применимость благодаря своей вычислительной эффективности, хотя и обладает ограниченной физической интерпретацией. В отличие от него динамический даунскейлинг, осуществляется через каскадное вложение региональных климатических моделей высокого пространственного разрешения в глобальные модели, позволяет воспроизводить влияние мезомасштабных физико-географических факторов – орографии, неоднородности подстилающей поверхности и береговых линий – на формирование региональных климатических условий.

Верификация прогнозов представляет собой обязательный компонент системы, включающий оценку успешности ретроспективных прогнозов, а также мониторинг качества оперативных прогнозов. Всемирная метеорологическая организация разработала методические рекомендации, позволяющие всесторонне оценивать качество вероятностных и детерминистских прогнозов через систему критерии качества (WMO-No. 1246). Главное место в этой системе занимает концепция "разрешающей способности" прогноза, то есть его умение различать вероятности в зависимости от ожидаемых климатических аномалий. Практическая оценка этого параметра выражается с помощью построения ROC-кривых, где анализируется соотношение между долей правильных предупреждений и частотой ложных тревог. Идеальный прогноз демонстрирует площадь под ROC-кривой, близкую к 1.0, тогда как значение 0.5 соответствует отсутствию прогностического сигнала. В реальных условиях хорошим результатом считается показатель порядка 0.7-0.8, что свидетельствует о превосходстве методического прогноза над климатическим прогнозом. Особую сложность представляет оценка "надежности" прогнозов, требующая сравнения прогнозируемых вероятностей с фактической частотой наступления событий. Для этого в качестве критерия используются специальные диаграммы надежности, где систематические отклонения от диагонали указывают на необходимость калибровки прогностической модели. Одновременно анализируется степень отклонения аномалий от климатических значений, поскольку именно этот параметр определяет практическую полезность для конечных пользователей. Прогнозы, которые слишком сосредоточены на средних значениях, хоть и демонстрируют более высокую надежность, могут быть малоинформативными для принятия решений. Особое внимание уделяется учёту неопределённости, обусловленной ограниченным объёмом статистических данных. Современные методы ресэмплинга, такие как бутстреп анализ, позволяют построить доверительные интервалы для всех ключевых показателей качества.

Глобальная прогностическая инфраструктура в системе сезонного прогнозирования

Всемирная метеорологическая организация создала комплексную инфраструктуру для поддержки доступа к данным сезонного прогнозирования, которая представляет собой многоуровневую систему взаимодействующих центров и механизмов обмена данными (WMO-No. 1246, 2020). Основу этой системы составляют Глобальные центры долгосрочных прогнозов (ГЦДП), которые в настоящее время включают 15 специализированных учреждений по всему миру (табл.1).

Таблица 1. Перечень функционирующих Глобальных центров долгосрочных прогнозов

Table 1. List of operational Global Producing Centres for Long-Range Forecasts

• Beijing: China Meteorological Administration (CMA) / Beijing Climate Center (BCC)	• Пекин: Китайское метеорологическое управление (CMA) / Пекинский климатический центр (BCC)
• Center for Weather Forecasts and Climate Studies (CPTEC) / National Institute for Space Research (INPE), Brazil	• Бразилия: Центр прогнозирования погоды и климатических исследований (CPTEC) / Национальный институт космических исследований (INPE)
• Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC)	• Италия: Евро-Средиземноморский центр по изменению климата (CMCC)
• European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	• Европа: Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF)
• Exeter: Met Office, United Kingdom	• Эксетер (Великобритания): Метеорологическое бюро (Met Office)
• Melbourne: Bureau of Meteorology (BOM), Australia	• Мельбурн: Бюро метеорологии (BOM), Австралия
• Montreal: Meteorological Service of Canada (MSC)	• Монреаль: Метеорологическая служба Канады (MSC)
• Moscow: Hydrometeorological Centre of Russia (RHMC)	• Москва: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (RHMC)
• Offenbach: Deutscher Wetterdienst (DWD)	• Оффенбах: Немецкая метеорологическая служба (DWD)
• Pretoria: South African Weather Services (SAWS)	• Претория: Метеорологическая служба Южной Африки (SAWS)
• Pune: India Meteorological Department (IMD)	• Пуне: Индийская метеорологическая служба (IMD)
• Seoul: Korea Meteorological Administration (KMA)	• Сеул: Корейская метеорологическая администрация (KMA)
• Tokyo: Japan Meteorological Agency (JMA) / Tokyo Climate Centre (TCC)	

Продолжение таблицы 1

<ul style="list-style-type: none">• Toulouse: Météo-France• Washington: Climate Prediction Center (CPC) / National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), United States of America• Seoul: Korea Meteorological Administration (KMA)• Tokyo: Japan Meteorological Agency (JMA) / Tokyo Climate Centre (TCC)• Toulouse: Météo-France• Washington: Climate Prediction Center (CPC) / National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), United States of America	<ul style="list-style-type: none">• Токио: Метеорологическое управление Японии (JMA) / Токийский климатический центр (TCC)• Тулуза: Météo-France• Вашингтон: Центр климатических прогнозов (CPC) / Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA), США• Пуне: Индийская метеорологическая служба (IMD)• Сеул: Корейская метеорологическая администрация (KMA)• Токио: Метеорологическое управление Японии (JMA) / Токийский климатический центр (TCC)• Тулуза: Météo-France• Вашингтон: Центр климатических прогнозов (CPC) / Национальное управление океанических и атмосферных исследований (NOAA), США
--	--

Гидрометцентр России на базе модели ПЛАВ выполняет обязательства ГЦДП и вносит свой вклад в предоставлении доступа к глобальным сезонным прогнозам на мировом уровне.

ГЦДП ежемесячно выпускают в оперативном режиме глобальные сезонные прогнозы с использованием современных моделей земной системы и передают данные в стандартизованных форматах, обеспечивая совместимость и сравнимость результатов. Каждый ГЦДП обязан поддерживать определенный уровень качества и расчет ретроспективных прогнозов за период не менее 15 лет, что позволяет оценивать и постоянно улучшать качество прогностических систем.

Центральным элементом инфраструктуры является Ведущий центр мультимодельных ансамблей долгосрочных прогнозов (LC-LRFMME), расположенный в г. Тэджоне (Республика Корея). Он играет ключевую роль в консолидации данных от различных Глобальных центров долгосрочного прогнозирования и координируется Корейской метеорологической администрацией и Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA).

На основе получаемых прогнозов центр ежемесячно формирует согласованный мультимодельный ансамбль, что существенно повышает надежность скомплексированного прогноза за счет минимизации систематических погрешностей отдельных моделей.

Еще одним ключевым элементом деятельности ВМО в области глобального сезонного прогнозирования является «Сезонный климатический бюлле-

тень» (Global Seasonal Climate Update). Этот сводный документ объединяет прогнозистические данные и анализ текущего состояния климатической системы. Бюллетень предоставляет комплексную картину состояния климатических условий для принятия решений как на глобальном, так и на региональном уровнях.

На региональном уровне работа Климатической информационной системы ВМО обеспечивается Региональными климатическими центрами (РКЦ). РКЦ специализируются на адаптации глобальных прогнозов к местным условиям, играя центральную роль в «каскадном» прогнозистическом процессе – последовательной детализации информации от глобальных масштабов до региональных. Функционал РКЦ выходит далеко за рамки оперативной прогнозистической деятельности. В их обязанности входит также укрепление потенциала национальных метеорологических служб, разработка отраслевых климатических продуктов и проведение сессий региональных климатических форумов. Наибольшее значение эта работа приобретает в регионах с ограниченными возможностями, где РКЦ фактически берут на себя роль центрального узла, обеспечивающего доступ к диагностической и прогнозистической информации. Северо-Евразийский климатический центр выполняет свои международные обязательства как РКЦ ВМО для территории Северной Евразии с 2013 г., обеспечивая метеорологические службы стран СНГ климатической информацией и услугами (Хан, 2017).

Важнейшим инструментом, который СЕАКЦ и другие РКЦ используют для укрепления потенциала метеослужб в зоне своей ответственности, являются Региональные климатические форумы (РКОФ). Эти мероприятия создают уникальную платформу для продуктивного диалога между поставщиками и потребителями климатических прогнозов. Сессии РКОФ проводятся на регулярной основе и приурочены к началу ключевых для пользователей сезонов, обеспечивая продуктивный диалог на одной площадке ведущих специалистов разного профиля.

Исторически сложилось, что в основе прогнозистических оценок РКОФ лежали преимущественно экспертные заключения, формируемые в процессе консенсусных обсуждений. Однако современный этап развития климатической науки диктует новые стандарты: на смену субъективным подходам приходят объективные методы, основанные на мультиモデルном ансамблевом прогнозировании.

Такой эволюционный переход приносит ощутимые преимущества – повышается объективность и обоснованность прогнозов, обеспечивается прозрачность используемых методик, усовершенствуется процесс воспроизведимости результатов и укрепляется доверие со стороны конечных пользователей.

Северо-Евразийский климатический центр с мая 2011 года регулярно проводит Региональные климатические форумы для стран СНГ (Хан, 2017), которые в номенклатуре Всемирной метеорологической организации (ВМО) получили название NEACOF (СЕАКОФ). СЕАКОФ объединяют усилия научных и специалистов в области мониторинга и прогнозирования климатиче-

ской изменчивости, что позволяет не только глубже понимать текущее состояние климатической системы, но и разрабатывать более надежные сезонные прогнозы по территории Северной Евразии. СЕАКОФ проводятся дважды в год в разных форматах: осенью мероприятия проходят в очном формате, а весной – в виртуальном режиме с использованием интернет-ресурсов. Особую ценность СЕАКОФ придает участие не только экспертов, конечных потребителей климатической информации, но и представителей научного сообщества. Такой диалог между разработчиками, поставщиками и пользователями консенсусных прогнозов позволяет совместно разрабатывать стратегии эффективного применения климатической информации и адаптировать их под конкретные нужды социально-экономического сектора. Благодаря такому комплексному подходу СЕАКОФ играет важную роль в развитии регионального сотрудничества и совершенствовании системы климатического прогнозирования на пространстве СНГ, обеспечивая более качественное и ориентированное использование климатической информации.

Параллельно с официальной инфраструктурой климатического обслуживания Всемирной метеорологической организации развивается ряд авторитетных альтернативных инициатив по системам сезонного прогнозирования. Эти инициативы, часто являющиеся результатом научно-практического сотрудничества, дополняют и обогащают глобальную прогностическую инфраструктуру. Ярким примером служит Азиатско-Тихоокеанский климатический центр (АТКЦ) в г. Пусане (Республика Корея), который разработал уникальную систему мультимодельного ансамблевого прогнозирования на глобальном и региональном уровнях. Помимо стандартных прогнозов, Центр предлагает специализированные сервисы в онлайн режиме, такие как оценка пожарной опасности и расчет климатических экстремальных индексов. Важной частью миссии АТКЦ является поддержка национальных метеорологических служб развивающихся стран путем проведения обучения и оказания технической помощи. Значительный вклад в работу этого консорциума вносят и российские учреждения: Гидрометцентр России и Главная геофизическая обсерватория (ГГО) на регулярной основе предоставляют сезонные прогнозы в АТКЦ, рассчитываемые по моделям ПЛАВ и ГГО.

В Европе Служба изменения климата Copernicus (C3S) консолидирует ведущие европейские климатические модели в мультимодельный ансамбль, выпуская не только стандартные сезонные прогнозы, но и отраслевые климатические продукты для различных секторов экономики, и предоставляя платформу для доступа к климатическим данным и инструментам визуализации.

На американском континенте важную функцию выполняет Североамериканский мультимодельный ансамбль (NMME), объединяющий прогностические системы США и Канады. Его ключевой особенностью является использование единого протокола всеми участниками, что обеспечивает совместимость данных и открывает широкие возможности для сравнительного анализа эволюции качества различных моделей.

Таким образом, альтернативные системы сезонного прогнозирования не подменяют, а эффективно дополняют официальную структуру климатиче-

ского обслуживания ВМО. Их существование стимулирует здоровую конкуренцию, обмен передовым опытом и, в конечном итоге, способствует прогрессу во всей области климатического прогнозирования. Для многих стран эти ресурсы представляют собой бесценную возможность получить доступ к современным прогностическим технологиям, минимизируя затраты на создание собственной вычислительной инфраструктуры.

Продукты сезонного прогнозирования: форматы представления и интерпретация

Современные системы сезонного прогнозирования предлагают разнообразные форматы представления климатической информации, каждый из которых имеет свои преимущества и области применения. Основой для всех видов прогностической продукции служит понятие климатической нормы – многолетнего среднего состояния атмосферы, относительно которого определяются аномалии. Выбор базового периода для вычисления нормы (обычно 30-летнего) имеет принципиальное значение, особенно в условиях меняющегося климата. Уточненные нормы, охватывающие последние годы, лучше отражают текущие климатические тенденции.

Детерминированные сезонные прогнозы, представляемые в виде аномалий ансамблевого среднего, дают общее представление о наиболее вероятном сценарии развития климатических условий. Однако такой формат не отражает всей полноты неопределенности, присущей долгосрочным прогнозам. Поэтому в современной практике предпочтение отдается вероятностным формам, которые количественно оценивают шансы реализации различных сценариев. Наиболее распространенным подходом является представление вероятностей для каждой из терцильных категорий, что позволяет пользователям оценить степень отклонения от климатической нормы.

Однако, по мнению ряда исследователей (Hansen et al., 2022), наряду с преимуществами данный подход имеет и ряд существенных ограничений. Ключевым из них является недостаточный учет локальных условий: прогнозы, составляемые для крупных регионов, не отвечают потребностям конечных пользователей, которым необходимы данные с более высоким пространственным разрешением. Во-вторых, в нём используются искусственные границы – деление на терцили (33-й и 67-й процентили) часто не совпадает с реальными пороговыми значениями для практических задач. Кроме того, понятие «нормы» пользователи могут трактовать по-разному. И наконец, такой подход не учитывает успешность прогноза, из-за чего остаётся неясным, насколько можно доверять данным, что ведёт к принятию неоптимальных решений.

В качестве альтернативы авторы предлагают новый подход под названием *Flexible Forecast* («гибкий прогноз»), реализованный в онлайн-платформе. Ключевое его преимущество заключается в отображении полного распределения вероятностей вместо трёх упрощённых категорий, возможностью выбора любых пороговых значений, значимых для конкретного пользо-

вателя. Предусмотрена опция сравнения прогноза с историческими данными, что помогает оценить, насколько текущие крупномасштабные циркуляционные условия отличаются от обычных.

Особое внимание уделяется визуализации данных – используются интерактивные картографические интерфейсы, позволяющие пользователям получать информацию для конкретных точек или регионов, сравнивать различные сценарии и анализировать исторические аналоги.

Современная система представления сезонных климатических прогнозов на платформе СЕАКЦ

В настоящее время Северо-Евразийский климатический центр предлагает комплексную систему доступа к сезонным климатическим прогнозам через свои вебресурсы (<https://seakc.meteoinfo.ru/ru/>).

Основу прогностической системы составляют три российские модели:

1. Модель Земной системы ИВМ РАН (INM-CM).
2. Прогностическая модель Гидрометцентра России (ПЛАВ).
3. Прогностическая модель Главной геофизической обсерватории (ГГО).

Мульти модельный подход позволяет пользователям проводить сравнительный анализ прогнозов, оценивать степень согласованности между различными моделями и формировать более обоснованные выводы во время анализа.

Технологическая платформа СЕАКЦ реализована на современной веб-архитектуре, обеспечивающей сбор и актуализацию прогностических данных, удобный интерактивный интерфейс для работы с прогнозами и хорошую производительность при обработке запросов.

Ядром системы является регулярный процесс обновления данных. Пользовательский интерфейс предлагает интуитивно понятную систему фильтров для выбора нужных параметров прогноза. С помощью выпадающих меню пользователь может задать географический регион (Евразия, Европа, Азия, Арктика или глобальный масштаб), метеорологические параметры (температура воздуха, осадки, геопотенциал и др.), временной диапазон (текущий месяц, сезонные прогнозы с различной заблаговременностью), а Техническая реализация системы основана на современных веб-технологиях динамического формирования запросов и адаптивную верстку для удобного просмотра на различных устройствах.

Доступ к прогностической информации осуществляется через разделы веб-сайта СЕАКЦ, включая:

- раздел сезонных прогнозов;
- раздел внутрисезонных прогнозов;
- раздел экстремальных явлений;
- раздел десятилетних прогнозов.

Пользователям также доступны специализированные прогностические продукты, такие как:

-
- индексы атмосферной циркуляции, отражающие крупномасштабные процессы в атмосфере;
 - индекс засушливости Педя и SPI – важные показатели для агроклиматического прогнозирования;
 - консенсусные прогнозы и др.

Эта система представляет собой важный инструмент для специалистов метеослужб стран СНГ, представителей сельского хозяйства и других отраслей, чья деятельность зависит от климатических условий. Сайт СЕАКЦ продолжает активно развиваться. В ближайших планах перед разработчиками стоит задача включения дополнительных функций обработки информации, расширения набора рассчитываемых индексов, улучшения алгоритмов визуализации данных. Дальнейшее развитие платформы СЕАКЦ будет способствовать повышению надежности и полезности долгосрочных прогнозов для различных категорий пользователей.

Научные исследования в поддержку оперативной деятельности на примере СЕАКЦ

Современные методы сезонного прогнозирования переживают этап активного развития благодаря внедрению новых технологий и научных подходов, которые существенно повышают их надежность и практическую ценность. Ключевым фактором успеха в этой области стала тесная интеграция фундаментальных исследований с оперативной деятельностью.

Долгое время в России отсутствовала технология сверхдолгосрочного динамического прогнозирования за пределами сезонного масштаба. Единственная климатическая модель, разработанная в Институте вычислительной математики РАН, хотя и позволяла учитывать факторы внутренней и внешней изменчивости с заданием граничных условий, была ограничена в своих возможностях прогнозированием классических климатических сценариев по формату СМIP экспериментов. Ситуация изменилась благодаря поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», в рамках которого была поставлена задача по адаптации этой модели для оперативного долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования метеорологических параметров.

Реализация этого проекта потребовала решения целого комплекса научных и технических задач. Особое значение имела разработка технологии выпуска гидрометеорологических прогнозов на периоды от сезона до нескольких лет – эта наукоемкая задача имеет стратегическое значение для многих отраслей национальной экономики. Знаковым достижением стало создание в 2023 году системы глобального ансамблевого сезонного прогноза на базе климатической модели INM-CM5, разработанной совместно Гидрометцентром России и ИВМ РАН. После успешных испытаний эта система была рекомендована к внедрению в оперативную практику (Хан и др., 2023, 2024).

Параллельно велась работа по созданию более совершенной версии модели – INM-CM6, которая отличается повышенным пространственным разрешением, улучшенным описанием физических процессов и оптимизированной вычислительной эффективностью. Сравнительный анализ двух версий моделей показывает заметный прогресс: INM-CM6 демонстрирует более высокую точность прогнозов по ключевым параметрам, хотя и сохраняет некоторые проблемы, особенно в прогнозировании давления на уровне моря и экстремальных осадков.

Проведенные испытания в 2022-2024 годах, включая ретроспективный анализ за 30-летний период, подтвердили перспективность нового подхода. Однако для полного раскрытия потенциала системы предстоит решить ряд задач по минимизации систематических ошибок и дальнейшему совершенствованию параметризаций. Развитие этих технологий открывает новые возможности для повышения качества прогнозов, что особенно важно в условиях наблюдаемых климатических изменений.

Прогнозирование климатических воздействий: интеграция методологии ESCAP и данных Северо-Евразийского климатического центра

Особое внимание уделяется оценке экономической и социальной полезности сезонных прогнозов, которая зависит также от способности пользователей эффективно использовать предоставленную информацию (Емелина и др. 2023). Исследования показывают, что даже прогнозы с умеренным качеством могут приносить значительную пользу, если они своевременно поступают и правильно интерпретируются. В этом контексте важную роль играют программы обучения пользователей, которые помогают преодолеть разрыв между поставщиками климатической информации и конечными потребителями.

Перспективные направления развития сезонного прогнозирования включают интеграцию методов искусственного интеллекта для улучшения прогностических моделей и постобработки, разработку систем "прогнозирования на основе воздействий" (impact-based forecasting), которые напрямую оценивают вероятные последствия климатических аномалий. Эти инновации постепенно трансформируют сезонное прогнозирование из чисто научной дисциплины в важнейший инструмент адаптации к изменению климата и управления климатическими рисками.

Экономическая и социальная комиссия ООН для Азии и Тихого океана (ESCAP) разработала систему прогнозирования на основе воздействий (Impact-Based Forecasting) (ESCAP & WMO, 2021), которая кардинально меняет парадигму от простого прогноза климатических условий на сезон к комплексной оценке их социально-экономических последствий.

Особую значимость этой системе придает стратегическое партнерство ESCAP с Северо-Евразийским климатическим центром, позволяющее создавать прикладные прогностические продукты для обширного региона Север-

ной Евразии. В основе сотрудничества лежит интеграция данных Северо-Евразийского климатического форума в аналитическую платформу ESCAP.

Этот опыт наглядно показывает, как партнерство между международными организациями и региональными климатическими центрами позволяет создавать принципиально новые инструменты для адаптации к изменению климата.

Заключение

Современное развитие сезонного климатического прогнозирования переживает период качественной трансформации, обусловленной стремительным научно-технологическим прогрессом. В результате комплексного анализа можно констатировать, что ключевым вектором развития стало углубленное понимание физических процессов климатической системы, достигнутое благодаря совершенствованию описания физических процессов в моделях и внедрению принципиально новых вычислительных подходов. Особое значение приобретает интеграция передовых технологий обработки данных, где сочетание традиционных численных методов с алгоритмами машинного обучения позволяет существенно повысить уровень прогностических оценок.

Важнейшим достижением последнего десятилетия стало формирование мульти модельных ансамблей, объединяющих прогностические продукты ведущих мировых центров. Такой подход не только снижает неопределенность прогнозов, но и создает основу для разработки специализированных климатических сервисов, ориентированных на конкретные сектора экономики. Примечательно, что особую роль в этом процессе играют региональные центры, такие как Северо – Евразийский климатический центр, которые адаптируют глобальные прогностические продукты к местным условиям, учитывая специфику региональных климатических процессов.

Перспективы дальнейшего развития тесно связаны с расширением временных горизонтов прогнозирования, где особый интерес представляют субсезонные (2-6 недель) и межгодовые (1-10 лет) масштабы. Реализация этого потенциала требует углубленного изучения долгопериодных климатических колебаний и их региональных проявлений, а также разработки новых методов комбинирования прогнозов разной заблаговременности. Особую актуальность приобретает совершенствование систем верификации, позволяющих объективно оценивать качество прогностической продукции и выявлять направления для дальнейшего улучшения.

Международное сотрудничество остается краеугольным камнем развития климатического прогнозирования. Укрепление партнерских связей между глобальными и региональными центрами, обмен данными и методиками, совместные исследовательские инициативы – все это создает основу для формирования единого мирового прогностического пространства.

В контексте наблюдаемых климатических изменений особую ценность приобретает практическая направленность прогностических разработок и

создание специализированных продуктов для сельского хозяйства, энергетики, водного хозяйства и других уязвимых секторов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (Проект № 25-77-31009).

Список литературы

Багров, Н.А., Кондратович, К.В., Педь, Д.А., Угрюмов, А.И. (1985) *Долгосрочные метеорологические прогнозы*, Л., Гидрометеоиздат, 248 с.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2015) Особенности наблюдаемых изменений климата на территории Северной Евразии по данным регулярного мониторинга и возможные их факторы, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 358, с. 13-35.

Батырева, О.В., Вильфанд, Р.М., Лукиянова, Л.Е. (1995) Метод сверхдолгосрочного прогноза аномалии средней месячной температуры воздуха по территории СНГ с использованием оптимальной комплексации и результаты его испытания, *Результаты испытания новых и усовершенствованных методов краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды*, Информационный сборник № 23, с. 126-129.

Блинова, Е.Н. (1976) *Динамика атмосферных движений планетарного масштаба и гидродинамический долгосрочный прогноз погоды*, М., Гидрометеоиздат, 78 с.

Вангенгейм, Г.Я. (1952) Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики, *Труды ААНИИ*, т. 23, 314 с.

Варгин, П.Н., Брагина, В.В., Володин, Е.М., Хан, В.М., Тарасевич, М.А. (2024) Исследование предсказуемости изменчивости стратосферного полярного вихря в Арктике в сезонных прогнозах климатической модели ИВМ РАН, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 60-72.

Вильфанд, Р.М., Васильев, А.А., Шестакова, Н.А. (2010) *80 лет Гидрометцентру России (1930-2010 сборник статей)*, М., Триада ЛТД, 454 с., электронный ресурс, URL: https://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/vilfand.pdf.

Вильфанд, Р.М., Емелина, С.В., Тищенко, В.А., Толстых, М.А., Хан, В.М. (2024) Статистическая коррекция долгосрочных прогнозов приземной температуры воздуха по модели ПЛАВ для территории Северной Евразии, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 5-16.

Вильфанд, Р.М., Мартазинова, В.Ф., Цепелев, В.Ю., Хан, В.М., Мироничева, Н.П., Елисеев, Г.В., Иванова, Е.К., Тищенко, В.А., Уткузова, Д.Н. (2017)

Опыт комплексирования синоптико-статистических и гидродинамических прогностических систем, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 5-17.

Володин, Е.М., Мортиков, Е.В., Кострыкин, С.В. и др. (2017) Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 53, № 2, с. 164-178.

Воробьева, В.В., Володин, Е.М. (2020) Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН, *Математическое моделирование*, т. 32, № 11, с. 47-58.

Воскресенская, Е.Н., Зеленько, А.А., Полонский, А.Б. (1992) Эль-Ниньо 1991-1992 годов и его проявления в тропической Атлантике, *Морской гидрофизический журнал*, № 6, с. 62-70.

Гирс, А.А. (1974) *Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов*, Л., Гидрометеоиздат, 485 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1981) О долгосрочных метеорологических прогнозах с использованием группы аналогов и оценке предсказуемости метеорологических процессов, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 77, с. 3-13.

Гущина, Д.Ю., Калиновская, М.В., Матвеева, Т.А. (2020) Влияние тихоокеанского десятилетнего колебания на характеристики Эль-Ниньо двух типов при возможных изменениях климата, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 14-28.

Давыдов, Г.И., Полонский, А.Б. (1996) Изменчивость системы океан-атмосфера в Австралио-Азиатском регионе в связи с Эль-Ниньо-Южное колебание, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 32, № 3.

Дианский, Н.А. (2013) *Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия*, М., Физматлит, 272 с.

Дымников, В.П., Залесный, В.Б., Глазунов, А.В., Степаненко, В.М. (2022) Модели климата, геофизических пограничных слоев и деятельного слоя суши: памяти В.Н. Лыкосова, *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 58, № 4, с. 375-383.

Емелина, С.В., Хан, В.М., Семенов, В.А., Воробьева, В.В., Тарасевич, М.А., Володин, Е.М. (2023) Использование сезонных гидродинамических прогнозов модели INM-CM5 для оценки сроков начала пыления березы, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 59, № 4, с. 407-416.

Железнова, И.В., Гущина, Д.Ю. (2015) Отклик глобальной циркуляции атмосферы на два типа Эль-Ниньо, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 36-50.

Железнова, И.В., Котляревская, А.Д., Гущина, Д.Ю. (2024) Воспроизведение фазы и амплитуды Колебания Маддена-Джулиана в различных версиях климатической модели ИВМ РАН, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 82-92.

Зеленько, А.А., Михайлова, Э.Н., Полонский, А.Б., Шапиро, Н.Б. (1983) Моделирование циркуляции и поля температуры в экваториальной зоне Атлантического океана, в кн.: *Гидрофизические исследования в Центральной Атлантике*, Севастополь, Изд. МГИ АН УССР, с. 31-40.

Киктев, Д.Б., Толстых, М.А., Мирвис, В.М. (2014) О предсказуемости экстремальных метеорологических явлений на временных масштабах до сезона. *Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации* (сб. докладов), М., с. 54-66.

Киктев, Д.Б., Хан, В.М., Крыжов, В.Н. и др. (2015) Технология выпуска долгосрочных прогнозов Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ), *Труды Гидрометцентра России*, вып. 358, с. 36-58.

Киктев, Д.Б., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А. (2015) Крупномасштабные модели атмосферной изменчивости. Часть I. Статистический анализ и гидродинамическое моделирование, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 5-22.

Киктев, Д.Б., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А. (2015) Крупномасштабные модели атмосферной изменчивости. Часть II. Их влияние на пространственное распределение температуры и осадков на территории Северной Евразии, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 5-14.

Крыжов, В.Н. (2012) *Вероятностный сезонный прогноз температуры воздуха на основе статистических связей метеорологических величин*. Дис. ... д-ра геогр. наук, М., 297 с.

Куликова, И.А., Вильфанд, Р.М., Хан, В.М., Круглова, Е.Н., Тищенко, В.А., Емелина, С.В., Каверина, Е.С., Набокова, Е.В., Субботин, А.В., Сумерова, К.А., Толстых, М.А. (2024) Климатические прогнозы. Часть I. Современное состояние и перспективы развития, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 5-24.

Куликова, И.А., Вильфанд, Р.М., Хан, В.М., Круглова, Е.Н., Тищенко, В.А., Емелина, С.В., Каверина, Е.С., Набокова, Е.В., Субботин, А.В., Сумерова, К.А., Толстых, М.А. (2024) Климатические прогнозы. Часть II. Вероятностные подходы, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 5-19.

Куликова, И.А., Набокова, Е.В., Хан, В.М., Володин, Е.М., Тарасевич, М.А. (2023) Колебание Маддена-Джулиана в контексте внутрисезонной изменчивости, дальних связей и предсказуемости, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 5-23.

Лубков, А.С., Воскресенская, Е.Н., Марчукова, О.В. (2017) Прогнозирование индекса Южного колебания, *Вестник Санкт-Петербургского университета, Науки о Земле*, т. 62, № 4, с. 370-388.

Лубков, А.С., Воскресенская, Е.Н., Марчукова, О.В. (2020) Применение нейронных сетей для модельного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья, включая их типы, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 111-121.

Мирвис, В.М., Мелешко, В.П. (2008) Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон, *Труды ГГО*, вып. 558, с. 3-40.

Мирвис, В.М., Мелешко, В.П., Львова, Т.Ю., Матюгин, В.А., Байдин, А.В. (2020) О предсказуемости крупных аномалий приземной температуры воздуха по данным исторических сезонных прогнозов, рассчитанных с использованием МОЦАО ГГО (T63L25/ИВМ РАН), *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова*, № 598, с. 137-154.

Муравьев, А.В., Казначеева, В.Д., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А. (1999) Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. I. Основные конструктивные и технические характеристики динамико-статистической схемы долгосрочного прогноза погоды, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 28-36.

Муравьев, А.В., Казначеева, В.Д., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А. (1999) Долгосрочное прогнозирование аномальных синоптических ситуаций. II. Условия эксперимента и результаты прогноза, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 5-15.

Осипов, А.М., Гущина, Д.Ю. (2021) Механизм формирования двух типов Эль-Ниньо в современном климате, *Вестник Московского университета. Серия 5. География*, № 1, с. 128-134.

Пагава, С.Т., Аристов, Н.А., Блюмина, Л.И., Туркетти, З.Л. (1966) *Основы синоптического метода сезонных прогнозов погоды*, Л., Гидрометеоиздат, 363 с.

Полонский, А.Б. (2001) Роль океана в современных изменениях климата, *Морской гидрофизический журнал*, № 6, с. 32-54.

Полонский, А.Б., Башарин, Д.В. (2002) О влиянии Североатлантического и Южного колебаний на изменчивость приземной температуры в Европейско-Средиземноморском регионе, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 38, № 1, с. 135-145.

Полосин, А.С. (1975) *Проблемы Эль-Ниньо*, М., Наука, 136 с.

Реснянский, Ю.Д., Зеленъко, А.А., Струков, Б.С., Степанов, В.Н., Хан, В.М., Воробьева, В.В., Тараксевич, М.А., Грицун, А.С., Володин, Е.М. (2024) Оценка успешности воспроизведения океанографических полей в ретроспективных прогнозах по модели Земной системы INM-CM5, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 5-20.

Семенов, В.А., Мартин, Т., Беренс, Л.К., Латиф, М., Астафьева, Е.С. (2017) Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5, *Лёд и Снег*, т. 57, № 1, с. 77-107.

Семенов, В.А., Черенкова, Е.А., Алдонина, Т.А. (2023) Современные и ожидаемые характеристики сезонного хода ледового покрова в морях Российской Федерации

ской Арктики, *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, т. 511, № 1, с. 112-118.

Сумерова, К.А., Варгин, П.Н., Лукьянов, А.Н., Хан, В.М. (2023) Анализ циркуляционных условий в тропосфере и стратосфере, способствующих формированию волн холода на северо-западе и в центре Европейской территории России в декабре 2021 г., *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 20-38.

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

Тищенко, В.А., Хан, В.М., Круглова, Е.Н., Куликова, И.А. (2016) Применение статистической коррекции детерминистских прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для Арктического региона, *Труды Гидрометцентра России*, вып. 361, с. 47-65.

Толстых, М.А., Желен, Ж.Ф., Володин, Е.М. и др. (2015) Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 25-35.

Толстых, М.А., Шашкин, В.В., Фадеев, Р.Ю. и др. (2017) *Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза*, М., Триада ЛТД, 167 с.

Угрюмов, А.И. (2006) *Долгосрочные метеорологические прогнозы*, СПб., ЗАО «НПП Система», 317 с.

Фадеев, Р.Ю., Шашкин, В.В., Толстых, М.А., Травова, С.В., Мизяк, В.Г., Рогутов, В.С., Алипова, К.А. (2021) Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году, *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, № 1(379), с. 58-72.

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

Хан, В.М., Вильфанд, Р.М., Крыжов, В.Н. и др. (2011) Мульти модельный подход при составлении прогнозов погоды на сезон, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 19-29.

Хан, В.М., Вильфанд, Р.М., Тищенко, В.А., Емелина, С.В., Грицун, А.С., Володин, Е.М., Воробьева, В.В., Тарасевич, М.А. (2023) Оценка изменений температурного режима по Северной Евразии на предстоящее пятилетие по прогнозам модели Земной системы ИВМ РАН и их возможных последствий для сельского хозяйства, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 14-28.

Хан, В.М., Круглова, Е.Н., Тищенко, В.А., Куликова, И.А., Субботин, А.В., Грицун, А.С., Володин, Е.М., Тарасевич, М.А., Брагина, В.В. (2024) Верификация сезонных ансамблевых прогнозов на базе модели Земной системы INM-CM5, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 40-55.

Цепелев, В.Ю., Хан, В.М. (2015) Вероятностное представление долго-

срочных метеорологических прогнозов, разработанных синоптическими методами, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 17-31.

Anderson, D.L.T. (2008) *Overview of seasonal forecasting*, in: *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*, Troccoli, A., Harrison, M., Anderson, D.L.T and Mason, S.J. (eds.), NATO Science Series, Springer Academic Publishers, pp. 45-66.

Baggett, C.F., Barnes, E.A., Maloney, E.D., Mundhenk, B.D. (2017) Advancing atmospheric river forecasts into subseasonal-to-seasonal time scales, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 14, pp. 7528-7536.

Baldwin, M.P., Stephenson, D.B., Thompson, D.W.J., Dunkerton, T.J., Charlton, A.J., O'Neill, A. (2003) Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts, *Science*, vol. 301, no. 5633, pp. 636-640.

Bi, K., et al. (2023) Accurate medium-range global weather forecasting with 3d neural networks, *Nature*, vol. 619, pp. 533-538.

Bjerknes, J. (1969) Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Monthly Weather Review*, vol. 97, no. 3, pp. 163-172.

Brayard, J., Counillon, F., Wang, Y., Kimmritz, M. (2023) Enhancing Seasonal Forecast Skills by Optimally Weighting the Ensemble from Fresh Data, *Weather and Forecasting*, vol. 38, pp. 2691-2705.

Burgers, G., Jin, F.F., van Oldenborgh, G.J. (2005) The simplest ENSO recharge oscillator, *Geophysical Research Letters*, vol. 32, no. 13, L13706.

Cassou, C. (2008) Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation, *Nature*, vol. 455, no. 7212, pp. 523-527.

Charney, J.G., Fjørtoft, R., von Neumann, J. (1950) Numerical integration of the barotropic vorticity equation, *Tellus*, vol. 2, no. 4, pp. 237-254.

Chen, L., et al. (2024) A machine learning model that outperforms conventional global subseasonal forecast models, *Nature Communications*, vol. 15, 6425.

de Burgh-Day, C.O., Leeuwenburg, T. (2023) Machine learning for numerical weather and climate modelling: a review, *Geoscientific Model Development*, vol. 16, pp. 6433-6477.

Doblas-Reyes, F.J., García-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.

Dunstone, N., Smith, D.M., Hardiman, S.C., et al. (2023) Windows of opportunity for predicting seasonal climate extremes highlighted by the Pakistan floods of 2022, *Nature Communications*, vol. 14, 6544.

ESCAP & WMO (2021) *Manual for Operationalizing Impact-based Forecasting and Warning Services (IBFWS)*, United Nations.

Frankignoul, C., Sennéchael, N. (2007) Observed influence of North Pacific SST anomalies on the atmospheric circulation, *Journal of Climate*, vol. 20, no. 3, pp. 592-606.

Gebbie, G., Eisenman, I., Wittenberg, A., Tziperman, E. (2007) Modulation of westerly wind bursts by sea surface temperature. A semistochastic feedback for ENSO, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 64, no. 9, pp. 3281-3295.

Gettelman, A., Fox-Kemper, B., Flato, G., et al. (2023) Kilometre-Scale Modelling of the Earth System: A New Paradigm for Climate Prediction, *WMO Bulletin*, vol. 72, no. 2, pp. 14-18.

Guo, Z., Dirmeyer, P.A., DelSole, T. (2011) Land surface impacts on subseasonal and seasonal predictability, *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L24812.

Hansen, J.W., Dinku, T., Robertson, A.W., Cousin, R., Trzaska, S., Mason, S.J. (2022) Flexible forecast presentation overcomes longstanding obstacles to using probabilistic seasonal forecasts, *Frontiers in Climate*, vol. 4, 908661.

Harrison, M., Troccoli, A., Williams, J.B., Coughlan, M. (2008) Seasonal Forecasts in Decision Making. In: Troccoli A., Harrison M., Anderson D.L.T., Mason S.J. (eds) *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*, Springer, pp. 13-42.

Hewitt, C., Moufouma-Okia, W. (2023) Climate Services Based on Climate Predictions and Projections, *WMO Bulletin*, vol. 72, no. 2, pp. 19-24.

Hoskins, B., Schopf P.S. (2008) *Ocean-Atmosphere basis for seasonal climate forecasting*, in: *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*, Troccoli A., Harrison M., Anderson, D.L.T and Mason S.J. (eds,), NATO Science Series, Springer Academic Publishers, pp. 67-90.

Hsu, H., Dirmeyer, P.A. (2021) Nonlinearity and multivariate dependencies in land-atmosphere coupling, *Water Resources Research*, vol. 57, e2020WR028179.

Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottersen, G., Visbeck, M. (Eds.). (2003) *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, American Geophysical Union.

Jansen, M.F., Dommelen, D., Keenlyside, N. (2009) Tropical Atmosphere–Ocean Interactions in a Conceptual Framework, *Journal of Climate*, vol. 22, no. 3, pp. 550-567.

Jin, E.K., Kinter, J.L., Wang, B., Park, C.-K., Kang, I.-S., Kirtman, B.P., Kug, J.-S., Kumar, A., Luo, J.-J., Schemm, J., Shukla, J., Yamagata, T. (2008) Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models, *Climate Dynamics*, vol. 31, no. 6, pp. 647-664.

Kent, C., Scaife, A.A., Dunstone, N.J., Smith, D., Hardiman, S.C., Dunstan, T., Watt-Meyer, O. (2025) Skilful global seasonal predictions from a machine learning weather model trained on reanalysis data, *Climate and Atmospheric Science*, vol. 8, no. 1, p. 314.

Kim, J.H., Kim, B.M., Lee, J.G., Lim, Y.K., Sim, J.H., Kim, J.H. (2025) Sea ice initialization and its impact on winter seasonal prediction skill over the Northern Hemisphere in coupled forecast system, *Journal of Climate*, vol. 38, no. 15, pp. 3989-4001.

Kirtman, B.P., and Coauthors (2014) The North American Multi-Model Ensemble (NMME): Phase-1 seasonal to interannual prediction, phase-2 toward developing intra-seasonal prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 95, no. 4, pp. 585-601.

Lamb, P.J., Peppler, R.A. (1987) North Atlantic Oscillation. Concept and an application, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 68, no. 10, pp. 1218-1225.

Luo, J.-J., Masson, S., Behera, S., Yamagata, T. (2008) Extended ENSO predictions using a fully coupled ocean-atmosphere model, *Journal of Climate*, vol. 21, no. 1, pp. 84-93.

Luo, J.-J., Yuan, C.X., Sasaki, W., Behera, S.K., Masson, S. (2016) *Current status of intraseasonal-seasonal-to-interannual prediction of the Indo-Pacific climate*. In: *Indo-Pacific Climate Variability and Predictability*, World Scientific, pp. 63-107.

Maher, N., McGregor, S., England, M.H., Sen Gupta, A. (2015) Effects of volcanism on tropical variability, *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 14, pp. 6024-6033.

Mariotti, A., Baggett, C., Barnes, E.A., et al. (2020) Windows of opportunity for skillful forecasts subseasonal to seasonal and beyond, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101, no. 5, pp. E608-E625.

Matveeva, T., Gushchina, D., Dewitte, B. (2018) The seasonal relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO in CMIP5, *Geoscientific Model Development*, vol. 11, no. 6, pp. 2373-2392.

McPhaden, M.J., Busalacchi, A.J., Cheney, R., Donguy, J.R., Gage, K.S., Halpern, D., Ji M., Julian, P., Meyers, G., Mitchum, G.T., Niiler, P.P., Picaut, J., Reynolds, R.W., Smith, N., Takeuchi, K. (1998) The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system. A decade of progress, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 103, no. C7, pp. 14169-14240.

Philander, S. (1986) Oceanography. Predictability of El Niño, *Nature*, vol. 321, pp. 810-811.

Rasmusson, E.M., Carpenter, T.H. (1982) Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño, *Monthly Weather Review*, vol. 110, no. 5, pp. 354-384.

Schott, F.A., Xie, S.-P., McCreary, J.P. (2009) Indian Ocean circulation and climate variability, *Reviews of Geophysics*, vol. 47, no. 1, RG1002.

Schubert, S., Wang, H., Suarez, M. (2011) Warm season subseasonal ariavbi-

lity and climate extremes in the Northern Hemisphere: The role of stationary Rossby waves, *Journal of Climate*, vol. 24, no. 18, pp. 4773-4792.

Shindell, D., Schmidt, G.A., Miller, R.L., Mann, M.E. (2003) Volcanic and solar forcing of climate change during the preindustrial era, *Journal of Climate*, vol. 16, no. 24, pp. 4094-4107.

Suarez, M.J., Schopf, P.S. (1988) A delayed action oscillator for ENSO, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 45, no. 21, pp. 3283-3287.

Tan, X.X., Tang, Y.M., Lian, T., Yao, Z.X., Li, X.J., Chen, D. (2019) A study of the effects of westerly wind bursts on ENSO based on CESM, *Climate Dynamics*, vol. 54, no. 1, pp. 885-899.

Vitart, F., Bonet, A., Brookshaw, A., et. al. (2017) The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 1, pp. 163-173.

Vitart, F., Balmaseda, M.A., Ferranti, L., Anderson, D. (2003) Westerly wind events and the 1997/98 El Niño event in the ECMWF seasonal forecasting system: A case study, *Journal of Climate*, vol. 16, no. 16, pp. 3153-3170.

Walker, G.T. (1923) Correlation in seasonal variations of weather. VIII. A preliminary study of world-weather, *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, vol. 24, no. 4, pp. 75-131.

Walker, G.T. (1924) Correlation in seasonal variations of weather. IX. A further study of world-weather, *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, vol. 24, no. 9, pp. 275-332.

Wang, C. (2001) A unified oscillator model for the El Niño-Southern Oscillation, *Journal of Climate*, vol. 14, no. 1, pp. 98-115.

World Meteorological Organization (WMO) (2020) *Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting* (WMO-No. 1246), Geneva.

Wu, L., He, F., Liu, Z., Li, C. (2007) Atmospheric teleconnections of tropical Atlantic variability: Interhemispheric, tropical-extratropical, and cross-basin interactions, *Journal of Climate*, vol. 20, no. 5, pp. 856-870.

Wyrtki, K., Stroup, E., Patzert, W., Williams, R., Quinn, W. (1976) Predicting and observing El Niño, *Science*, vol. 191, no. 4225, pp. 343-346.

References

Bagrov, N.A., Kondratovich, K.V., Ped', D.A., Uglyumov, A.I. (1985) *Dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy* [Long-Term Weather Forecasts], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 248 p.

Bardin, M.Yu, Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2015) Osobennosti nablyudaemykh izmenenii klimata na territorii Severnoi Evrazii po dannym reguljarnogo monitoringa i vozmozhnye ikh faktory [Features of observed climate

changes in Northern Eurasia according to regular monitoring data and their possible factors], *Trudy Gidrometsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia], no. 358, pp. 13-35.

Batyreva, O.V., Vil'fand, R.M., Lukyanova, L.E. (1995) Metod sverkhdolgosrochnogo prognoza anomalii srednei mesyachnoi temperatury vozdukha po territorii SNG s ispol'zovaniem optimal'noi kompleksatsii i rezul'taty ego ispytaniya [A method for very long-range forecasting of mean monthly air temperature anomalies over the CIS territory using optimal combination and results of its testing], *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh metodov kratkosrochnykh i dolgosrochnykh prognozov pogody. Informatsionnyi sbornik no. 23* [Results of testing new and improved methods for short-range and long-range weather forecasts. Information collection no. 23], pp. 126-129.

Blinova, E.N. (1976) *Dinamika atmosfernykh dvizhenii planetarnogo masshtaba i gidrodinamicheskii dolgosrochnyi prognoz pogody* [Dynamics of planetary-scale atmospheric motions and hydrodynamic long-range weather forecasting], Gidrometeoizdat, Moscow, Russia, 78 p.

Vangengeim, G.Ya. (1952) Osnovy makrotsirkulyatsionnogo metoda dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov dlya Arktiki [Fundamentals of the macrocirculation method for long-term meteorological forecasts for the Arctic], *Trudy AANII* [Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute], vol. 23, 314 p.

Vargin, P.N., Bragina, V.V., Volodin, E.M., Khan, V.M., Tarasevich, M.A. (2024) Issledovanie predskazuemosti izmenchivosti stratosfernogo polyarnogo vikhrya v Arktike v sezonnnykh prognozakh klimaticheskoi modeli IVM RAN [Study of the predictability of stratospheric polar vortex variability in the Arctic in seasonal forecasts of the INM RAS climate model], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 8, pp. 60-72.

Vil'fand, R.M., Vasil'ev, A.A., Shestakova, N.A. (2010) *80 let Gidrometsentru Rossii: 1930-2010, sbornik statei* [80 years to the Hydrometeorological Center of Russia: 1930-2010, collection of articles], Triada LTD, Moscow, Russia, 454 p. URL: https://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/vilfand.pdf.

Vil'fand, R.M., Emelina, S.V., Tishchenko, V.A., Tolstykh, M.A., Khan, V.M. (2024) Statisticheskaya korreksiya dolgosrochnykh prognozov prizemnoi temperatury vozdukha po modeli PLAV dlya territorii Severnoi Evrazii [Statistical correction of long-range forecasts of surface air temperature using the SLAV model for Northern Eurasia], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 5, pp. 5-16.

Vil'fand, R.M., Martazinova, V.F., Tsepelev, V.Yu., Khan, V.M., Mironicheva, N.P., Eliseev, G.V., Ivanova, E.K., Tishchenko, V.A., Utkuzova, D.N. (2017) Opyt kompleksirovaniya sinoptiko-statisticheskikh i hidrodinamicheskikh progностических систем [Experience in combining synoptic-statistical and hydrodynamic forecasting systems], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 8, pp. 5-17.

Volodin, E.M., Mortikov, E.V., Kostrykin, S.V., et al. (2017) Vospriozvedenie sovremennoego klimata v novoi versii modeli klimaticheskoi sistemy IVM RAN [Reproduction of the modern climate in the new version of the INM RAS climate system model], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 53, no. 2, pp. 164-178.

Vorob'eva, V.V., Volodin, E.M. (2020) Eksperimental'nye issledovaniya sezonnii predskazuemosti pogody, vypolnennye na osnove klimaticheskoi modeli IVM RAN [Experimental studies of seasonal weather predictability performed using the INM RAS climate model], *Matematicheskoe modelirovaniye*, vol. 32, no. 11, pp. 47-58.

Voskresenskaya, E.N., Zel'enko, A.A., Polonskii, A.B. (1992) El'-Nino' 1991-1992 godov i ego proyavleniya v tropicheskoi Atlantike [The 1991-1992 El Niño and its manifestations in the tropical Atlantic], *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, no. 6, pp. 62-70.

Girs, A.A. (1974) *Makrotsirkulyatsionnyi metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov* [Macrocirculation Method of Long-Range Weather Forecasts], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 485 p.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya. (1981) O dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozakh s ispol'zovaniem gruppy analogov i otsenke predskazuemosti meteorologicheskikh protsessov [On long-range meteorological forecasts using a group of analogs and assessment of the predictability of meteorological processes, *Trudy VNIIGMI-MTsD* [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center], no. 77, pp. 3-13.

Gushchina, D.Yu., Kalinovskaya, M.V., Matveeva, T.A. (2020) Vliyanie tikhookeanskogo desyatiletnego kolebaniya na kharakteristiki El'-Nino' dvukh tipov pri vozmozhnykh izmeneniyakh klimata [Influence of the Pacific Decadal Oscillation on the characteristics of two types of El Niño under possible climate changes, *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 14-28.

Davydov G.I., Polonskii A.B. 1996. Izmenchivost' sistemy okean-atmosfera v Avstralno-Aziatskom regione v svyazi s El'-Nino'-Yuzhnoe kolebanie [Variability of the ocean-atmosphere system in the Austral-Asian region in connection with El Niño-Southern Oscillation], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 32, no. 3.

Dianskii, N.A. (2013) *Modelirovaniye tsirkulyatsii okeana i issledovaniye ego reaktsii na kratkoperiodnye i dolgoperiodnye atmosfernye vozdeistviya* [Modeling Ocean Circulation and Studying its Response to Short-Period and Long-Period Atmospheric Impacts], Fizmatlit, Moscow, Russia, 272 p.

Dymnikov, V.P., Zalesnyi, V.B., Glazunov, A.V., Stepanenko, V.M. (2022) Modeli klimata, geofizicheskikh pogranichnykh sloev i deyatel'nogo sloya sushi: pamyati V.N. Lykosova [Models of climate, geophysical boundary layers, and land surface layer: in memory of V.N. Lykosov], *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 58, no. 4, pp. 375-383.

Emelina, S.V., Khan, V.M., Semenov, V.A., Vorob'eva, V.V., Tarasevich, M.A., Volodin, E.M. (2023) Ispol'zovanie sezonnnykh gidrodinamicheskikh prognozov modeli INM-CM5 dlya otsenki srokov nachala pyleniya berezy [Using seasonal hydrodynamic forecasts of the INM-CM5 model to estimate the start dates of birch pollen season], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 59, no. 4, pp. 407-416.

Zheleznova, I.V., Gushchina, D.Yu. (2015) Otklik global'noi tsirkulyatsii atmosfery na dva tipa El'-Nino' [Response of the global atmospheric circulation to two types of El Niño], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 36-50.

Zheleznova, I.V., Kotlyarevskaya, A.D., Gushchina, D.Yu. (2024) Vosproizvedenie fazy i amplitudy Kolebaniya Maddena-Dzhuliana v razlichnykh versiyakh klimaticheskoi modeli IVM RAN [Reproduction of the phase and amplitude of the Madden-Julian Oscillation in different versions of the INM RAS climate model], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 9, pp. 82-92.

Zel'enko, A.A., Mikhailova, E.N., Polonskii, A.B., Shapiro, N.B. (1983) Modelirovaniye tsirkulyatsii i polya temperatury v ekvatorial'noi zone Atlanticheskogo okeana [Modeling circulation and temperature fields in the equatorial zone of the Atlantic Ocean], *Gidrofizicheskie issledovaniya v Tsentral'noi Atlantike* [Hydrophysical Research in the Central Atlantic], Izd. MGI AN USSR, Sevastopol, Moscow, Russia, pp. 31-40.

Kiktev, D.B., Tolstykh, M.A., Mirvis, V.M. (2014) O predskazuemosti ekstremal'nykh meteorologicheskikh yavlenii na vremennykh masshtabakh do sezona [On the predictability of extreme meteorological phenomena on time scales up to a season], *Ekstremal'nye povodki v basseine r. Amur: prichiny, prognozy, rekomendatsii (sb. dokladov)* [Extreme floods in the Amur River basin: causes, forecasts, recommendations (collection of reports)], Moscow, Russia, pp. 54-66.

Kiktev, D.B., Khan, V.M., Kryzhov, V.N. et al. (2015) Tekhnologiya vypuska dolgosrochnykh prognozov Severo-Evraziiskogo klimaticheskogo tsentra (SEAKTs) [Technology for issuing long-range forecasts of the North Eurasian Climate Centre (NEACC)], *Trudy Gidrometsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia], no. 358, pp. 36-58.

Kiktev, D.B., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A. (2015) Krupnomasshtabnye mody atmosfernoi izmenchivosti. Chast' I. Statisticheskii analiz i hidrodinamicheskoe modelirovaniye [Large-scale modes of atmospheric variability. Part I. Statistical analysis and hydrodynamic modeling], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 3, pp. 5-22.

Kiktev, D.B., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A. (2015) Krupnomasshtabnye mody atmosfernoi izmenchivosti. Chast' II. Ikh vliyanie na prostranstvennoe raspredelenie temperatury i osadkov na territorii Severnoi Evrazii [Large-scale modes of atmospheric variability. Part II. Their influence on the spatial distribution of temperature and precipitation over Northern Eurasia], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 4, pp. 5-14.

Kryzhev, V.N. (2012) *Veroyatnostnyi sezonnnyi prognoz temperatury vozdukha na osnove statisticheskikh svyazei meteorologicheskikh velichin* [Probabilistic seasonal air temperature forecast based on statistical relationships of meteorological quantities], Doctor's thesis, Moscow, Russia, 297 p.

Kulikova, I.A., Vil'fand, R.M., Khan, V.M., Kruglova, E.N., Tishchenko, V.A., Emelina, S.V., Kaverina, E.S., Nabokova, E.V., Subbotin, A.V., Sumerova, K.A., Tolstykh, M.A. (2024) *Klimaticheskie prognozy. Chast' I. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Climate forecasts. Part I. Current state and development prospects], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 5-24.

Kulikova, I.A., Vil'fand, R.M., Khan, V.M., Kruglova, E.N., Tishchenko, V.A., Emelina, S.V., Kaverina, E.S., Nabokova, E.V., Subbotin, A.V., Sumerova, K.A., Tolstykh, M.A. (2024) *Klimaticheskie prognozy. Chast' II. Veroyatnostnye podkhody* [Climate forecasts. Part II. Probabilistic approaches], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 8, pp. 5-19.

Kulikova, I.A., Nabokova, E.V., Khan, V.M., Volodin, E.M., Tarasevich, M.A. (2023) *Kolebanie Maddena-Dzhuliana v kontekste vnutrisezonnoi izmenchivosti, dal'nikh svyazei i predskazuemosti* [The Madden-Julian Oscillation in the context of intraseasonal variability, teleconnections, and predictability], *Meteorology i gidrologiya*, no. 8, pp. 5-23.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2017) *Prognozirovaniye indeksa Yuzhnogo kolebaniya* [Forecasting the Southern Oscillation Index], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle* [Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences], vol. 62, no. 4, pp. 370-388.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2020) *Primenenie neironnykh setei dlya model'nogo prognoza El'-Nino' i La-Nin'ya, vkluchaya ikh tipy* [Application of neural networks for model forecasting of El Niño and La Niña, including their types], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 111-121.

Mirvis, V.M., Meleshko, V.P. (2008) *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya meteorologicheskikh prognozov na mesyats i sezony* [Current state and prospects for the development of monthly and seasonal meteorological forecasts], *Trudy GGO*, no. 558, pp. 3-40.

Mirvis, V.M., Meleshko, V.P., L'vova, T.Yu., Matyugin, V.A., Baidin, A.V. (2020) *O predskazuemosti krupnykh anomalii prizemnoi temperatury vozdukha po dannym istoricheskikh sezonnnykh prognozov, rasschitannykh s ispol'zovaniem MOTsAO GGO (T63L25/IVM RAN)* [On the predictability of large surface air temperature anomalies based on historical seasonal forecasts calculated using the GGO AOGCM (T63L25/INM RAS)], *Trudy Glavnogo geofizicheskogo observatorii im. A.I. Voeikova*, no. 598, pp. 137-154.

Murav'ev, A.V., Kaznacheeva, V.D., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A. (1999) *Dolgosrochnoe prognozirovaniye anomal'nykh sinopticheskikh situatsii. I. Osnovnye konstruktivnye i tekhnicheskie kharakteristiki dinamiko-statisticheskoi*

skhemy dolgosrochnogo prognoza pogody [Long-range forecasting of anomalous synoptic situations. I. Main design and technical characteristics of the dynamic-statistical scheme for long-range weather forecasting], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 28-36.

Murav'ev, A.V., Kaznacheeva, V.D., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A. (1999) Dolgosrochnoe prognozirovaniye anomal'nykh sinopticheskikh situatsii. II. Usloviya eksperimenta i rezul'taty prognoza [Long-range forecasting of anomalous synoptic situations. II. Experimental conditions and forecast results], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 4, pp. 5-15.

Osipov, A.M., Gushchina, D.Yu. (2021) Mekhanizm formirovaniya dvukh tipov El'-Niño' v sovremennom climate [Formation mechanism of two types of El Niño in the modern climate], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, no. 1, pp. 128-134.

Pagava, S.T., Aristov, N.A., Blyumina, L.I., Turketi, Z.L. (1966) *Osnovy sinopticheskogo metoda sezonnnykh prognozov pogody* [Fundamentals of the Synoptic Method for Seasonal Weather Forecasts], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 363 p.

Polonskii, A.B. (2001) Rol' okeana v sovremennykh izmeneniyakh klimata [The role of the ocean in modern climate changes], *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, no. 6, pp. 32-54.

Polonskii, A.B., Basharin, D.V. (2002) O vliyanii Severoatlanticheskogo i Yuzhnogo kolebanii na izmenchivost' prizemnoi temperatury v Evropeisko-Sredizemnomorskem regione [On the influence of the North Atlantic and Southern Oscillations on surface temperature variability in the European-Mediterranean region], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 38, no. 1, pp. 135-145.

Polosin, A.S. (1975) *Problemy El'-Niño'* [Problems of El Niño], Moscow, Russia.

Resnyanskii, Yu.D., Zel'enko, A.A., Strukov, B.S., Stepanov, V.N., Khan, V.M., Vorob'eva, V.V., Tarasevich, M.A., Gritsun, A.S., Volodin, E.M. (2024) Otsenka uspeshnosti vosproizvedeniya okeanograficheskikh polei v retrospektivnykh prognozakh po modeli Zemnoi sistemy INM-CM5 [Assessment of the success in reproducing oceanographic fields in retrospective forecasts using the INM-CM5 Earth System Model], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 3, pp. 5-20.

Semenov, V.A., Martin, T., Berens, L.K., Latif, M., Astaf'eva, E.S. (2017) Izmeneniya ploshchadi arktilcheskikh morskikh l'dov v ansamblakh klimaticheskikh modelei CMIP3 i CMIP5 [Changes in the area of Arctic sea ice in ensembles of CMIP3 and CMIP5 climate models], *Led i Sneg*, vol. 57, no. 1, pp. 77-107.

Semenov, V.A., Cherenkova, E.A., Aldonina, T.A. (2023) Sovremennye i ozhidaemye kharakteristiki sezonnogo khoda ledovogo pokrova v moryakh Rossiiskoi Arktiki [Current and expected characteristics of the seasonal cycle of ice cover in the seas of the Russian Arctic]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, vol. 511, no. 1, pp. 112-118.

Sumerova, K.A., Vargin, P.N., Luk'yanov, A.N., Khan, V.M. (2023) Analiz tsirkulyatsionnykh uslovii v troposfere i stratosfere, sposobstvuyushchikh formirovaniyu voln kholoda na severo-zapade i v tsentre Evropeiskoi territorii Rossii v dekabre 2021 g. [Analysis of circulation conditions in the troposphere and stratosphere contributing to the formation of cold waves in the northwest and center of European Russia in December 2021], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 20-38.

Tishchenko, V.A., Khan, V.M., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A. (2019) Prognozirovaniye osadkov i temperatury v basseine reki Amur na mesyachnykh i sezonnnykh intervalakh vremeni [Forecasting precipitation and temperature in the Amur River basin on monthly and seasonal time scales], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 3, pp. 24-39.

Tishchenko, V.A., Khan, V.M., Kruglova, E.N., Kulikova, I.A. (2016) Primenenie statisticheskoi korrektsii deterministovskikh prognozov temperatury vozdukha i osadkov po modeli PLAV dlya Arkticheskogo regiona [Application of statistical correction of deterministic forecasts of air temperature and precipitation using the SLAV model for the Arctic region], *Trudy Gidrometsentra Rossii*, no. 361, pp. 47-65.

Tolstykh, M.A., Zhelen, Zh.F., Volodin, E.M., et al. (2015) Razrabotka mnogomasshtabnoi versii global'noi modeli atmosfery PLAV [Development of a multiscale version of the SLAV global atmosphere model], *Meteorologiya i hidrologiya*, no. 6, pp. 25-35.

Tolstykh, M.A., Shashkin, V.V., Fadeev, R.Yu., et al. (2017) *Sistema modelirovaniya atmosfery dlya beshovnogo prognoza* [Atmosphere Modeling System for Seamless Prediction], Triada LTD, Moscow, Russia, 167 p.

Ugryumov, A.I. (2006) *Dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy* [Long-Term Weather Forecasts], ZAO «NPP Sistema», St. Petersburg, Russia.

Anderson, D.L.T. (2008) *Overview of seasonal forecasting*, in: *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*, in Troccoli, A, Harrison, M, Anderson, D.L.T and Mason S.J. (eds.), NATO Science Series, Springer Academic Publishers, pp. 45-66.

Baggett, C.F., Barnes, E.A., Maloney, E.D., Mundhenk, B.D. (2017) Advancing atmospheric river forecasts into subseasonal-to-seasonal time scales, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 14, pp. 7528-7536.

Baldwin, M.P., Stephenson, D.B., Thompson, D.W.J., Dunkerton, T.J., Charlton, A.J., O'Neill, A. (2003) Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts, *Science*, vol. 301, no. 5633, pp. 636-640.

Bi, K., et al. (2023) Accurate medium-range global weather forecasting with 3d neural networks, *Nature*, vol. 619, pp. 533-538.

Bjerknes, J. (1969) Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Monthly Weather Review*, vol. 97, no. 3, pp. 163-172.

Brajard, J., Counillon, F., Wang, Y., Kimmritz, M. (2023) Enhancing Seasonal Forecast Skills by Optimally Weighting the Ensemble from Fresh Data, *Weather and Forecasting*, vol. 38, pp. 2691-2705.

Burgers, G., Jin, F.F., van Oldenborgh, G.J. (2005) The simplest ENSO recharge oscillator, *Geophysical Research Letters*, vol. 32, no. 13, L13706.

Cassou, C. (2008) Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation, *Nature*, vol. 455, no. 7212, pp. 523-527.

Charney, J.G., Fjørtoft, R., von Neumann, J. (1950) Numerical integration of the barotropic vorticity equation, *Tellus*, vol. 2, no. 4, pp. 237-254.

Chen, L., et al. (2024) A machine learning model that outperforms conventional global subseasonal forecast models, *Nature Communications*, vol. 15, p. 6425.

de Burgh-Day, C.O., Leeuwenburg, T. (2023) Machine learning for numerical weather and climate modelling: a review, *Geoscientific Model Development*, vol. 16, pp. 6433-6477.

Doblas-Reyes, F.J., García-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.

Dunstone, N., Smith, D.M., Hardiman, S.C., et al. (2023) Windows of opportunity for predicting seasonal climate extremes highlighted by the Pakistan floods of 2022, *Nature Communications*, vol. 14, p. 6544.

ESCAP & WMO (2021) *Manual for Operationalizing Impact-based Forecasting and Warning Services* (IBFWS), United Nations.

Frankignoul, C., Sennéchael, N. (2007) Observed influence of North Pacific SST anomalies on the atmospheric circulation, *Journal of Climate*, vol. 20, no. 3, pp. 592-606.

Gebbie, G., Eisenman, I., Wittenberg, A., Tziperman, E. (2007) Modulation of westerly wind bursts by sea surface temperature. A semistochastic feedback for ENSO, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 64, no. 9, pp. 3281-3295.

Gettelman, A., Fox-Kemper, B., Flato, G., et al. (2023) Kilometre-Scale Modelling of the Earth System: A New Paradigm for Climate Prediction, *WMO Bulletin*, vol. 72, no. 2, pp. 14-18.

Guo, Z., Dirmeyer, P.A., DelSole, T. (2011) Land surface impacts on subseasonal and seasonal predictability, *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L24812.

Hansen, J.W., Dinku, T., Robertson, A.W., Cousin, R., Trzaska, S., Mason, S.J. (2022) Flexible forecast presentation overcomes longstanding obstacles to using probabilistic seasonal forecasts, *Frontiers in Climate*, vol. 4, 908661.

Harrison, M., Troccoli, A., Williams, J.B., Coughlan, M. (2008) Seasonal Forecasts in Decision Making, in Troccoli A., Harrison M., Anderson D.L.T., Mason S.J. (eds.), *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*, Springer, pp. 13-42.

Hewitt, C., Moufouma-Okia, W. (2023) Climate Services Based on Climate Predictions and Projections, *WMO Bulletin*, vol. 72, no. 2, pp. 19-24.

Hoskins B., Schopf P.S. (2008) *Ocean-Atmosphere basis for seasonal climate forecasting*, *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*, in Troccoli A, Harrison M, Anderson D.L.T and Mason S.J. (eds.), NATO Science Series, Springer Academic Publishers, pp. 67-90.

Hsu, H., Dirmeyer, P.A. (2021) Nonlinearity and multivariate dependencies in land-atmosphere coupling, *Water Resources Research*, vol. 57, e2020WR028179.

Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottersen, G., Visbeck, M. (Eeds.) (2003) *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, American Geophysical Union.

Jansen, M.F., Dommelget, D., Keenlyside, N. (2009) Tropical Atmosphere-Interactions in a Conceptual Framework, *Journal of Climate*, vol. 22, no. 3, pp. 550-567.

Jin, E.K., Kinter, J.L., Wang, B., Park, C.-K., Kang, I.-S., Kirtman, B.P., Kug, J.-S., Kumar, A., Luo, J.-J., Schemm, J., Shukla, J., Yamagata, T. (2008) Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models, *Climate Dynamics*, vol. 31, no. 6, pp. 647-664.

Kent, C., Scaife, A.A., Dunstone, N.J., Smith, D., Hardiman, S.C., Dunstan, T., Watt-Meyer, O. (2025) Skilful global seasonal predictions from a machine learning weather model trained on reanalysis data, *Climate and Atmospheric Science*, vol. 8, no. 1, p. 314.

Kim, J.H., Kim, B.M., Lee, J.G., Lim, Y.K., Sim, J.H., Kim, J.H. (2025) Sea ice initialization and its impact on winter seasonal prediction skill over the Northern Hemisphere in coupled forecast system, *Journal of Climate*, vol. 38, no. 15, pp. 3989-4001.

Kirtman, B.P., and Coauthors (2014) The North American Multi-Model Ensemble (NMME): Phase-1 seasonal to interannual prediction, phase-2 toward developing intra-seasonal prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 95, no. 4, pp. 585-601.

Lamb, P.J., Peppler, R.A. (1987) North Atlantic Oscillation. Concept and an application, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 68, no. 10, pp. 1218-1225.

Luo, J.-J., Masson, S., Behera, S., Yamagata, T. (2008) Extended ENSO predictions using a fully coupled ocean-atmosphere model, *Journal of Climate*, vol. 21, no. 1, pp. 84-93.

Luo, J.-J., Yuan, C.X., Sasaki, W., Behera, S.K., Masson, S. (2016) Current status of intraseasonal-seasonal-to-interannual prediction of the Indo-Pacific climate, *Indo-Pacific Climate Variability and Predictability*, World Scientific, pp. 63-107.

Maher, N., McGregor, S., England, M.H., Sen Gupta, A. (2015) Effects of volcanism on tropical variability, *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 14, pp. 6024-6033.

Mariotti, A., Baggett, C., Barnes, E.A., et al. (2020) Windows of opportunity for skillful forecasts subseasonal to seasonal and beyond, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101, no. 5, pp. E608-E625.

Matveeva, T., Gushchina, D., Dewitte, B. (2018) The seasonal relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO in CMIP5, *Geoscientific Model Development*, vol. 11, no. 6, pp. 2373-2392.

McPhaden, M.J., Busalacchi, A.J., Cheney, R., Donguy, J.R., Gage, K.S., Halpern, D., Ji M., Julian, P., Meyers, G., Mitchum, G.T., Niiler, P.P., Picaut, J., Reynolds, R.W., Smith, N., Takeuchi, K. (1998) The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system. A decade of progress, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 103, no. C7, pp. 14169-14240.

Philander, S. (1986) Oceanography. Predictability of El Niño, *Nature*, vol. 321, pp. 810-811.

Rasmusson, E.M., Carpenter, T.H. (1982) Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño, *Monthly Weather Review*, vol. 110, no. 5, pp. 354-384.

Schott, F.A., Xie, S.-P., McCreary, J.P. (2009) Indian Ocean circulation and climate variability, *Reviews of Geophysics*, vol. 47, no. 1, RG1002.

Schubert, S., Wang, H., Suarez, M. (2011) Warm season subseasonal variability and climate extremes in the Northern Hemisphere: The role of stationary Rossby waves, *Journal of Climate*, vol. 24, no. 18, pp. 4773-4792.

Shindell, D., Schmidt, G.A., Miller, R.L., Mann, M.E. (2003) Volcanic and solar forcing of climate change during the preindustrial era, *Journal of Climate*, vol. 16, no. 24, pp. 4094-4107.

Suarez, M.J., Schopf, P.S. (1988) A delayed action oscillator for ENSO, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 45, no. 21, pp. 3283-3287.

Tan, X.X., Tang, Y.M., Lian, T., Yao, Z.X., Li, X.J., Chen, D. (2019) A study of the effects of westerly wind bursts on ENSO based on CESM, *Climate Dynamics*, vol. 54, no. 1, pp. 885-899.

Vitart, F., Bonet, A., Brookshaw, A., et. al. (2017) The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 1, pp. 163-173.

Vitart, F., Balmaseda, M.A., Ferranti, L., Anderson, D. (2003) Westerly wind

events and the 1997/98 El Niño event in the ECMWF seasonal forecasting system: A case study, *Journal of Climate*, vol. 16, no. 16, pp. 3153-3170.

Walker, G.T. (1923) Correlation in seasonal variations of weather. VIII. A preliminary study of world-weather, *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, vol. 24, no. 4, pp. 75-131.

Walker, G.T. (1924) Correlation in seasonal variations of weather. IX. A further study of world-weather, *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, vol. 24, no. 9, pp. 275-332.

Wang, C. (2001) A unified oscillator model for the El Niño–Southern Oscillation, *Journal of Climate*, vol. 14, no. 1, pp. 98-115.

World Meteorological Organization (WMO) (2020) *Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting* (WMO-No. 1246), Geneva.

Wu, L., He, F., Liu, Z., Li, C. (2007) Atmospheric teleconnections of tropical Atlantic variability: Interhemispheric, tropical-extratropical, and cross-basin interactions, *Journal of Climate*, vol. 20, no. 5, pp. 856-870.

Wyrtki, K., Stroup, E., Patzert, W., Williams, R., Quinn, W. (1976) Predicting and observing El Niño, *Science*, vol. 191, no. 4225, pp. 343-346.

Статья поступила в редакцию (Received): 08.09.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 16.10.2025.

Принята к публикации (Accepted): 23.10.2025.

Для цитирования / For citation

Хан, В.М., Вильфанд, Р.М. (2025) Сезонное климатическое прогнозирование: от научных основ к практическим решениям, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 11, № 4, doi:10.21513/2410-8758-2025-4-467-505, стр. 467-505.

Khan, V.M., Vilfand, R.M. (2025) Seasonal climate forecasting: from scientific foundations to practical solutions, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 11, № 4, pp. 467-505, doi:10.21513/2410-8758-2025-4-467-505.