

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.5

Повторяемость зимних режимов атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом регионе и связанные с ними экстремальные погодно-климатические аномалии в Северном полушарии

Б.А. Бабанов^{✉1}, В.А. Семенов^{1,2}, М.Г. Акперов¹,
И.И. Мохов^{1,3}, N.S. Keenlyside^{4*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, Россия

²Институт географии РАН
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, Россия

⁴Geophysical Institute, University of Bergen
7803, Bergen, Allégaten, 70, Norway

Поступила в редакцию 3.11.2022 г.;
после доработки 9.01.2023 г.;
принята к печати 20.02.2023 г.

Получены количественные оценки региональных особенностей распределения повторяемости экстремальных аномалий температуры, осадков и ветра в зимние месяцы во внетропической зоне Северного полушария, связанные с режимами атмосферной циркуляции (далее режим) в Евро-Атлантическом регионе. Методом кластерного анализа k -средних по суточным полям высоты геопотенциала реанализа ERA5 за 1979–2021 гг. выделены четыре наиболее характерных зимних режима циркуляции атмосферы в Евро-Атлантическом регионе, соответствующие Североатлантическому колебанию (САК) в положительной (САК+) и отрицательной (САК–) фазах, скандинавскому блокингу и режиму с аномально высоким давлением над Северной Атлантикой и низким над Европой. Проанализированы тренды повторяемости и структуры режимов. Режимы САК+ и САК– оказались несимметричными по пространственной структуре с существенно разной повторяемостью (33 и 19% соответственно). Несимметричностью характеризуются и связанные с ними поля экстремальных погодных аномалий. Для всех режимов отмечается несимметричный отклик повторяемости положительных и отрицательных аномалий температуры. За исследуемый период не отмечено статистически значимых трендов сезонной повторяемости режимов, а также значимых трендов средних сезонных полей режимов в области экстремумов аномалий высоты геопотенциала. Это может свидетельствовать об устойчивости данных режимов в современных условиях изменения климата.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, погодные режимы, кластеризация, погодные аномалии, Североатлантическое колебание, Евро-Атлантический регион; atmospheric circulation, weather regimes, cluster analysis, weather anomalies, North-Atlantic Oscillation, Euro-Atlantics.

Введение

Атмосферная циркуляция в зимний период во внетропических широтах Северного полушария характеризуется интенсивной изменчивостью ввиду значительных меридиональных температурных контрастов и сильных потоков турбулентного тепла с по-

верхности океанов [1]. Эта изменчивость обладает определенной пространственно-временной структурой, часто описываемой с помощью циркуляционных мод [2] – типичных структур аномалий барических полей, изменения которых составляют существенную часть общей изменчивости циркуляции (как правило, описываемой давлением на уровне моря или высотой геопотенциальных поверхностей в тропосфере). Такие моды или структуры дальних связей (телеконнекций) можно выделять методами, основанными на использовании ковариационных матриц изменчивости метеорологических полей, в том числе разложением на эмпирические ортогональные функции [3].

* Борис Андреевич Бабанов (babanov@ifaran.ru); Владимир Анатольевич Семенов (vasemenov@ifaran.ru); Мирсеид Габиль оглы Акперов (aseid@ifaran.ru); Игорь Иванович Мохов (mohov@ifaran.ru); Noel Sebastian Keenlyside (noel.keenlyside@uib.no).

С модами изменчивости связаны характерные структуры аномалий температуры и осадков. Ведущей модой изменчивости в Евро-Атлантическом регионе является Североатлантическое колебание [4, 5], зимой объясняющее значительную часть изменчивости температуры в Европе и на территории России [6, 7].

На структуру атмосферной циркуляции могут влиять условия на нижней границе атмосферы (температура поверхности океана, сплоченность морских льдов), а также внешние воздействия на земную климатическую систему, что обуславливает наличие потенциала предсказуемости погоды на субсезонных и более длительных масштабах [2, 8, 9].

Еще одним распространенным подходом к изучению изменений атмосферной циркуляции является метод выделения погодно-климатических режимов [10, 11]. Он сводится к группировке структурных объектов с подобными (общими) характеристиками (чертами) внутри групп и значимыми различиями между объектами разных групп. Степень внутригруппового подобия и межгруппового различия, в том числе для выделения характерных структурных особенностей циркуляционных процессов в земной климатической системе, можно определять разными методами [12].

Во многих исследованиях региональных особенностей циркуляционных процессов в атмосфере в середине XX в. в рамках задач прогноза погоды использовались так называемые субъективные методы выделения типов режимов [13–15]. С конца XX в. распространение и рост вычислительных мощностей компьютеров позволили разработать и широко применять основанные на обработке больших объемов данных численные методы классификации — объективные методы типизации [16]. В настоящее время они широко используются в разных областях атмосферных и климатических исследований [17, 18], в том числе для диагностики изменений структуры изменчивости атмосферной циркуляции и улучшения предсказуемости погодных аномалий [19, 20].

В ряде работ с помощью объективных методов типизации выделяются режимы атмосферной циркуляции и анализируется их связь с погодными аномалиями, чаще всего температурой, осадками и ветром [19, 21, 22]. Например, поля аномалий температуры и осадков, связанные с режимами САК и скандинавского блокинга (СКАНД), для Северного полушария в целом и для Европы в частности выделены в [23, 24].

Повышенный интерес представляют именно экстремальные аномалии, так как они, как правило, приводят к наибольшим социально-экономическим последствиям. Показано, что для каждой исследуемой области в Евро-Атлантике повышенная частота экстремальных температур и осадков наблюдается преимущественно во время определенных циркуляционных режимов, однако область анализа таких событий была ограничена областью выделения режимов [25]. В других работах связь режимов и экстремальных погодных явлений проанализиро-

вана более детально, но сами аномалии изучались над некоторой ограниченной областью [21, 26] либо исследовались отдельные эпизоды экстремальных явлений [27].

Цель данной работы — изучить влияние четырех зимних циркуляционных режимов в Евро-Атлантическом регионе на частоту экстремальных погодных аномалий в более широкой области, а именно во всем внетропическом Северном полушарии (от 30° с.ш. и выше), по данным реанализа ERA5 за последние десятилетия, а также проанализировать многолетние тренды структуры режимов и тренды временных рядов повторяемости этих режимов, чтобы выявить ожидаемые изменения повторяемости экстремальных погодных явлений в будущем.

Данные и методы

Для анализа атмосферной циркуляции использовались суточные поля высоты геопотенциальной поверхности на уровне 500 гПа (z_{500}), а для погодных аномалий — суточные поля температуры на уровне 2 м (T_2M), поля среднесуточной скорости ветра на уровне 10 м (WS_{10}) и суточной суммы полных осадков (TP) в зимний сезон (декабрь — февраль) по данным реанализа ERA5 с 1979 по 2021 г. [28].

Для выделения режимов атмосферной циркуляции использовался метод кластерного анализа — метод k -средних, являющийся одним из наиболее распространенных в приложении к задачам метеорологии и изменений климата (см., например, [29, 30]). Режимы выделялись по полям высоты геопотенциала в Евро-Атлантическом регионе (ЕАТ) между 30 и 90° с.ш. и 80° з.д. и 40° в.д., такая же область использовалась в работах [31, 32]. В других исследованиях, например в [20, 30, 33], для режимов в ЕАТ исследуется схожая область, но со сдвигом на 10° южнее и западнее. Такой небольшой сдвиг обычно не влияет на общую картину режимов.

Перед кластеризацией поля высоты геопотенциала были предварительно обработаны с использованием стандартной методологии (см., например, [32]): 1) для получения полей аномалий из оригинальных суточных полей вычиталось климатологическое среднее, сглаженное 5-дневным скользящим средним; 2) с целью уменьшения размерности применяли разложение на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ), значения аномалий перед этим предварительно нормировали на корень из широты, чтобы уравновесить вклад дисперсии узлов сетки.

Для кластеризации использовались поля, восстановленные по 10 первым ЭОФ, объясняющим 83% дисперсии. Отметим, что при кластеризации в других работах применяют разное число первых ЭОФ (например, 4 в [34], 14 в [30]). При этом результаты кластеризации практически не меняются в данном диапазоне количества ЭОФ [23, 35].

Кластеризация методом k -средних предполагает, что исследователю заранее известно число кластеров k . Определение этого числа представляет

собой сложную задачу, однако для зимних режимов в Евро-Атлантического регионе, пользуясь различными методами определения количества кластеров, традиционно обосновывают и выделяют четыре режима атмосферной циркуляции [29, 30, 36]. Для возможности сопоставления с результатами других исследований в настоящей работе было также выбрано $k = 4$.

Средние поля аномалий высоты геопотенциала на уровне 500 гПа для четырех режимов представлены на рис. 1 (цв. вкладка). Хотя кластеризация проводилась для области 80° з.д. – 40° в.д., 30–90° с.ш., поля показаны для всей внетропической зоны ($\geq 30^\circ$ с.ш.) Северного полушария, для которой анализировались аномалии температуры, ветра и осадков. Выделенные режимы визуально идентичны четырем традиционным зимним евро-атлантическим режимам (например, как в [30–32]) и названы соответствующим образом: САК+ и САК– (NAO+ и NAO– в англоязычных статьях) – режимы, ассоциированные с фазами САК, СКАНД (SB – Scandinavian Blocking) – режим, связанный с блокинговым процессом над Европейским континентом, и АТЛ (ATL или AR – Atlantic Ridge) – режим, характеризующийся положительной аномалией высоты геопотенциала над Северной Атлантикой.

Поля режимов рассчитывались как среднее поле аномалий высоты геопотенциала для всех дней, отнесенных к данным режимам по результатам кластеризации. Для анализа устойчивости структуры выделенных режимов (т.е. средних полей) были рассчитаны линейные тренды средних сезонных полей режимов за анализируемый период с оценкой их статистической значимости (рис. 1, нижний ряд). Тренды считались по временным рядам средних за сезон аномалий z500 по дням, отнесенных к режимам за каждый зимний сезон (всего 42 зимних сезона для каждого временного ряда).

Поля повторяемости экстремальных событий считались как количество дней для определенного циркуляционного режима с аномалиями температуры, осадков и ветра выше общего для всех режимов 95-го перцентиля (для температуры дополнительно считалась повторяемость отклонений ниже 5-го перцентиля, т.е. частота очень холодных дней). Аномалии считались так же, как для поля высоты геопотенциала. Для учета разности повторяемости самих режимов полученные поля повторяемости экстремальных событий нормировались на ожидаемое количество дней с аномалиями выше 95-го (или ниже 5-го) перцентиля

$$N_{\text{ожд } j} = N_j(1 - 0,95), \quad (1)$$

где N_j – общее число дней, проведенных в данном режиме.

Тренды средних сезонных полей и временные ряды сезонной и месячной повторяемости режимов (и их тренды) строились только по полным зимним сезонам (декабрь – февраль), поэтому при их расче-

те были отброшены январь и февраль 1979 г. и декабрь 2021 г. (итого 42 полных сезона). При расчете самих режимов и повторяемости экстремальных событий использовались данные за все зимние месяцы 1979–2021 гг.

Результаты

1. Особенности и тренды полей режимов

По результатам кластеризации получены четыре зимних режима циркуляции (см. рис. 1, верхний ряд). Режимы САК+ и САК– можно связать с фазами САК, режим СКАНД характеризуется положительной аномалией высоты геопотенциала с центром над Скандинавией, а режим АТЛ – сильной положительной аномалией высоты геопотенциала над Северной Атлантикой и более слабой отрицательной аномалией на востоке Европы. Из 3881 зимнего дня за 1979–2021 гг. полная (относительная) повторяемость кластеров САК+, САК–, СКАНД и АТЛ составила 1250 (32,2%), 758 (19,5%), 1071 (27,6%) и 802 (20,7%) дня соответственно.

Стоит отметить, что режим САК– не является полной пространственной противоположностью режиму САК+. Положительная аномалия высоты геопотенциала в САК– смещена в сторону Гренландии по сравнению с отрицательной аномалией в САК+, которая располагается немного южнее Исландии. Коэффициент пространственной корреляции средних полей режимов САК+ и САК– составляет –0,57. Отсутствие симметрии режимов САК+ и САК– также проявляется в их относительной частоте: 32,2% у САК+ против 19,5% у САК–. Связь между режимами САК+, САК– и индексом САК проиллюстрирована на рис. 2, где представлены временные ряды осредненного за три месяца индекса САК [37] и разности сезонной повторяемости указанных режимов. Коэффициент корреляции индекса с повторяемостью режима равен +0,73 для САК+ и –0,86 для САК–; а с разностью повторяемостей этих режимов – 0,89. Аналогичное сопоставление встречается в работе [38]. В ней качественно сравниваются повторяемости зимних режимов САК+ и САК–, полученные по среднемесячным полям давления, с индексом САК; также обсуждается упомянутая выше асимметрия между этими режимами.

На рис. 1 также показаны тренды средних сезонных полей аномалий режимов за исследуемый период. Видно, что для всех режимов во внетропической части Северного полушария наблюдается в целом положительный тренд, который может быть связан с общим климатическим трендом z500 в связи с термическим расширением тропосферы [39]. Стоит отметить, что области значимых трендов (на уровне 95%, т.е. $p\text{-value} \leq 0,05$) сосредоточены преимущественно на южных границах внетропической зоны Северного полушария.

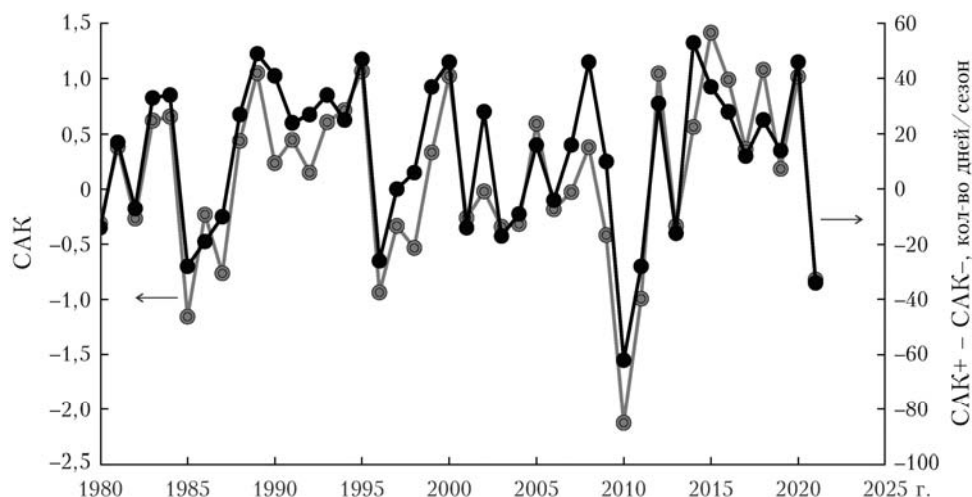


Рис. 2. Сопоставление временных рядов индекса САК [37], осредненного за зимние месяцы, и разности повторяемости режимов САК+ и САК-. Коэффициент корреляции временных рядов 0,89

Непосредственно в секторе ЕАТ, по которому считались режимы, области значимых положительных трендов также сосредоточены в основном на его границах. Можно отметить крупные области: 1) вокруг моря Баффина для режима САК+; 2) на юго-западной и юго-восточной границах сектора для режима АТЛ. При этом значимые тренды для каждого из режимов находятся в удалении от абсолютных максимумов аномалий $z500$ средних полей этих режимов (рис. 1, верхний ряд), что свидетельствует о том, что характерная структура выделенных режимов сохраняется в течение исследуемого периода.

2. Экстремальные события, связанные с режимами

Повторяемость экстремальных событий (ниже 5-го и выше 95-го процентиля функции распределения вероятности), наблюдающихся во время выделенных режимов, представлена на рис. 3 (цв. вкладка). Для режима САК+ характерна пониженная более чем в 3 раза по сравнению с ожидаемой частота аномально холодных и повышенная частота аномально теплых дней над европейским континентом. Противоположная картина наблюдается над Северной Атлантикой южнее Гренландии: для САК+ наблюдается повышенная в 1,2–2 раза по сравнению с ожидаемой частота сильных осадков на севере Европы и повышенная до 2,5 раз частота аномально сильного ветра на северо-западе от Европы.

Для режима САК- наблюдается обратная режиму САК+ смещенная на север картина как для температуры, так и для осадков и скорости ветра. Например, частота аномально холодных дней над севером Европы повышена по сравнению с ожидаемой до 3 раз и более. На юге Европы и севере Африки частота аномально теплых дней повышена до 2–2,5 раз. В центре Европе наблюдается нейтральная зона, в которой частота экстремальных аномалий температуры ($T2M > 95\%$) равна ожидаемой. На севере Европы и России начинается зона

с пониженной в 3 раза и более частотой $T2M > 95\%$. К югу от Гренландии наблюдается повышение частоты аномально теплых дней в 3 раза и более и аналогичное понижение холодных дней. Отмечается повышенная в 2–3 раза частота сильных осадков на западе Пиренейского полуострова и повышенная до 3 раз частота сильного ветра на широте Азорских островов вдоль всего Атлантического океана.

Несмотря на то что для режимов САК+ и САК- наблюдаются противоположные картины частоты аномалий $T2M$, TP и $WS10$, пространственные распределения повторяемости этих аномалий не являются полностью симметричными. Пространственное распределение повторяемости аномалий $T2M$, TP и $WS10$ при режиме САК- в европейском регионе смещена на северо-запад относительно режима САК+, т.е. в сторону максимума положительной аномалии $z500$ у режима САК-. Визуально для указанных режимов наиболее симметричными друг другу оказались поля повторяемости экстремального ветра ($WS10 > 95\%$ на рис. 3).

Во время режима СКАНД наблюдается увеличение частоты аномально теплых и уменьшение частоты экстремально холодных дней непосредственно над и немного севернее Скандинавии и Северного моря. Над континентальной Европой, кроме Скандинавии, и на юго-западе от Гренландии наблюдается пониженная до 3 раз и более частота аномально теплых дней, частота же аномально холодных слегка повышена. На северо-западе Европы отмечается уменьшение частоты аномально сильных осадков и ветра.

Для территории России повторяемость аномально теплых и аномально холодных дней при режимах САК+, САК- и СКАНД качественно согласуется с результатами работы [7], где исследуется влияние фазы САК и скандинавской моды на продолжительность аномальных волн тепла и холода на территории России, рассчитанных по данным стационарных наблюдений. При режиме САК+ аналогично положительной фазе индекса САК происходит рост (снижение) числа аномально теплых (холодных)

дней на большей части территории России (с уменьшением влияния на восток), а во время режимов САК– и СКАНД, аналогично отрицательной фазе САК и положительной фазе Скандинавской моды, отмечается увеличение (уменьшение) числа аномально холодных (теплых) дней.

Для режима АТЛ наблюдается повышенная (пониженная) частота аномально теплых (холодных) дней над зоной положительной аномалии высоты геопотенциала. Над этой же областью отмечается пониженная частота дней с аномально сильным ветром, а немного восточнее — область с пониженной частотой сильных осадков. Область с повышенной частотой сильных осадков мы видим на западе Гренландии.

В целом для всех режимов отмечается ослабление их влияния на повторяемость экстремальных событий в удаленных от области действия (80° з.д. — 40° в.д.) режимах региона, однако для режимов САК– и АТЛ влияние распространяется и на достаточно удаленные области. Для АТЛ заметно кратное снижение, т.е. в несколько раз меньше ожидаемого, повторяемости экстремально холодных дней (рис. 3, $T2M < 5\%$) вплоть до западного побережья Северной Америки, а для режима САК– наблюдается кратное снижение повторяемости экстремально теплых дней вплоть до Восточной Сибири.

Между полями повторяемости экстремальных положительных и отрицательных аномалий T2M для всех режимов наблюдается некоторая асимметрия как по пространству, так и по величине повторяемости (т.е. повышенная в два раза частота аномалий $T2M > 95\%$ в некоторой точке для конкретного рассматриваемого режима не означает пониженную в 2 раза частоту $T2M < 5\%$), что может объясняться несимметричностью кумулятивной функции распределения аномалий приземной температуры в зимние месяцы [40].

3. Тренды повторяемости режимов

На рис. 4 представлены графики временных рядов и линейные аппроксимации сезонной повторяемости режимов за полные сезоны 1980–2021 гг. Видно, что наклон линейных аппроксимаций едва заметен, ни для одного из режимов не наблюдается статистически значимых трендов. В таблице представлены средняя сезонная повторяемость режимов за 42 года и среднеквадратическое отклонение (СКО) повторяемости. Средняя повторяемость в процентах слегка отличается от относительной повторяемости в начале раздела «Результаты», так как при ее расчете не учитывались дни из месяцев, не вошедших в полные зимние сезоны (см. конец раздела «Данные и методы»). Из таблицы видно, что слабые незначимые тренды наблюдаются на фоне очень высокого СКО повторяемости (от 42,7% в СКАНД до 91,1% в САК–).

Средняя сезонная повторяемость режимов, СКО повторяемости и значимость трендов линейных аппроксимаций повторяемости

Показатель	Режим			
	САК+	САК–	СКАНД	АТЛ
Средняя сезонная повторяемость режима, кол-во дней (% от всех дней сезона)	29,5 (32,7%)	17,1 (18,9%)	24,9 (27,5%)	18,9 (20,9%)
СКО, кол-во дней (% от средней повторяемости)	15,3 (51,8%)	15,6 (91,1%)	10,6 (42,7%)	10,2 (53,9%)

Таким образом, повторяемость режимов очень сильно меняется от года к году, в среднем сохраняя устойчивость за 42-летний период. Следует отметить, что видимая на графиках периодичность

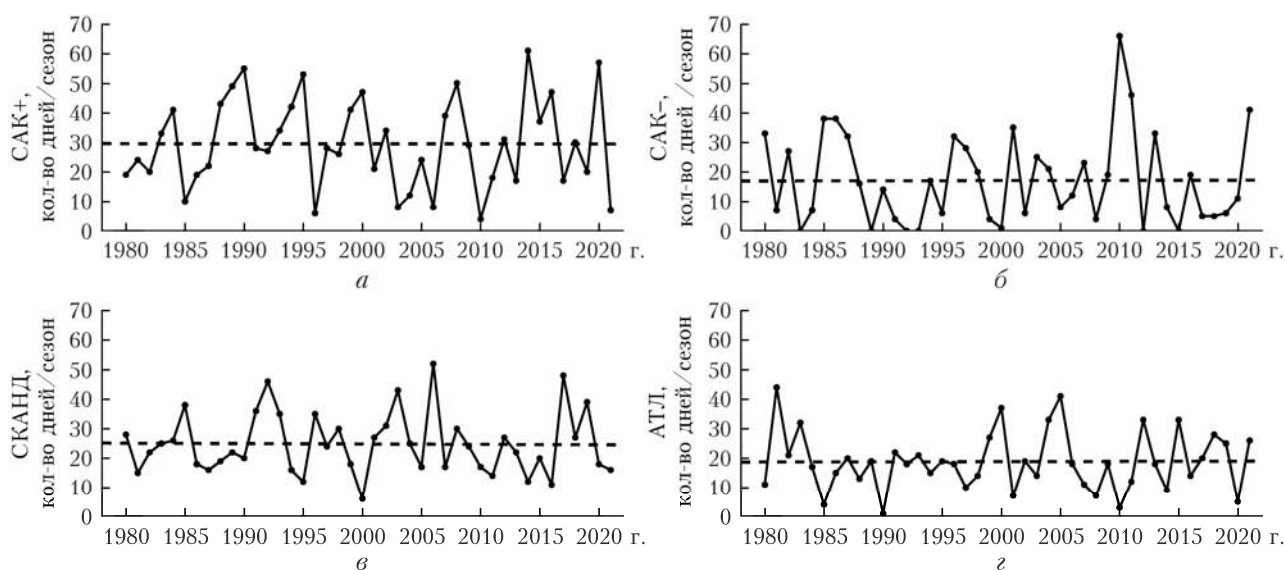


Рис. 4. Временные ряды сезонной повторяемости зимних режимов (сплошная линия) САК+ (а), САК– (б), СКАНД (в) и АТЛ (з) и их линейные тренды (пунктирная линия)

сезонной повторяемости не подтверждается автокорреляционным анализом — максимальная автокорреляция сезонной повторяемости режимов не превышает 0,2.

Помимо полной сезонной повторяемости были также исследованы тренды месячной повторяемости режимов. В отличие от сезонных, эти тренды более сильные, но также статистически не значимые. Сравнение трендов сезонной и месячной повторяемости представлено на рис. 5. Наибольшие тренды наблюдаются для САК+ в декабре и феврале, причем они разнонаправленные, что приводит к гораздо более слабому общему сезонному тренду.

Абсолютная величина месячных трендов САК+: $-0,083$ дней/год в декабре и $+0,104$ дней/год в феврале; за 42 года это привело к изменению продолжительности САК+ на $-3,48$ и $+4,39$ дней в месяц

соответственно, что заметно в сравнении с общей продолжительностью этих месяцев в 31 и 28 дней, учитывая, что речь только об одном из четырех режимов. При сохранении подобных тенденций в месячной повторяемости режима САК+ следует ожидать уменьшения (увеличения) числа anomalно теплых (холодных) дней в Европе в декабре и увеличения в феврале.

Стоит отметить менее значимые, но заметные тренды: положительный тренд АТЛ в декабре и отрицательные тренды СКАНД и АТЛ в феврале, для этих режимов характерна пониженная частота anomalно теплых дней над европейским континентом (см. рис. 3), что так же, как и тренды САК+, должно приводить к уменьшению числа anomalно теплых дней в декабре в Европе и их росту в феврале.

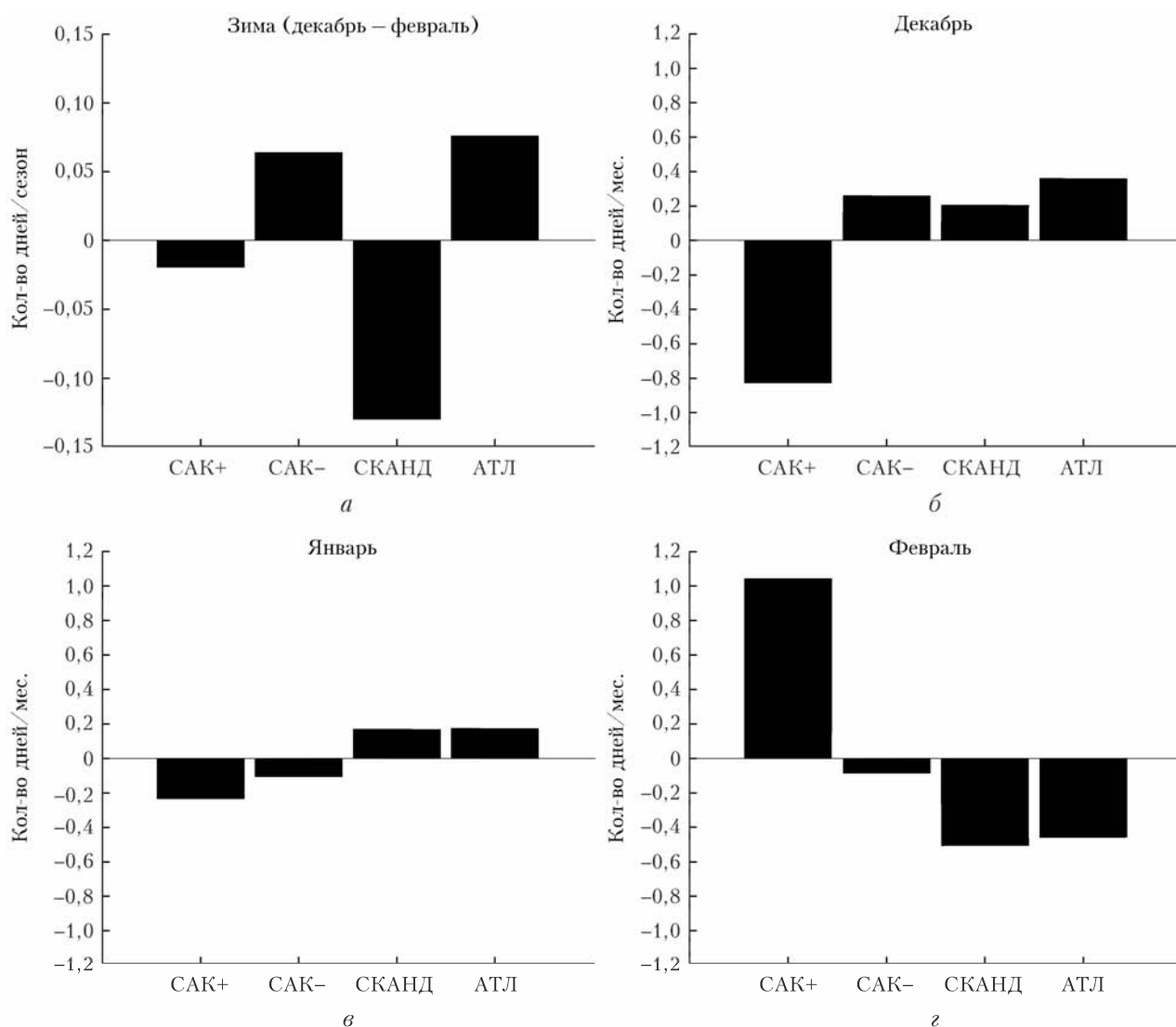


Рис. 5. Десятилетние линейные тренды сезонной (а) и месячной (б, в, г) повторяемости зимних режимов САК+, САК-, СКАНД и АТЛ. Тренды представлены как десятилетние для удобства

Заключение

С использованием метода кластерного анализа k -средних выделены четыре режима атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом регионе в зимние месяцы для последних десятилетий (1979–2021 гг.): САК+, САК–, СКАНД и АТЛ. Полученные режимы визуально согласуются с традиционными зимними режимами. Разность повторяемости режимов САК+ и САК– хорошо коррелирует с зимним индексом САК, коэффициент корреляции составляет 0,89. Режимы САК+ и САК– при этом оказались не симметричными: различаются как их частоты повторяемости, так и средние поля аномалий $z500$.

Для полученных режимов рассчитаны поля повторяемости экстремальных (95-й процентиль функции распределения вероятности) погодных аномалий во внетропической зоне Северного полушария. Для каждого из режимов характерны свои особенности повторяемости экстремальных явлений в прилегающих к Евро-Атлантическому регионам. Например, в европейском регионе сильнее всего выделяется кратное снижение частоты экстремально холодных дней во время режима САК+ и рост, преимущественно на севере Европы, во время САК–. Аномально теплые дни над Европой характерны для САК+, остальным режимам свойственно кратное снижение частоты таких дней.

Анализ полей повторяемости экстремальных аномалий T2M, TP и WS10 выявил, в частности, несимметричный отклик на режимы САК+ и САК–, что указывает на возможное преимущество кластерного подхода по сравнению с другими методами определения фазы САК – по знаку разницы давлений на станциях в разных точках либо с помощью анализа главных компонент разложения полей давления или высоты геопотенциала на ЭОФ, дающими, по определению, две симметричные фазы. Также отмечается асимметричность полей повторяемости положительных и отрицательных экстремальных аномалий T2M для всех режимов, что может быть связано с асимметрией функций распределения суточных приземных температур зимой.

Проанализированы тренды структуры полей режимов и временные ряды их сезонной и месячной повторяемостей. Для средних сезонных полей режимов наблюдаются значимые положительные тренды на границах Евро-Атлантического региона, которые могут быть связаны с общим климатическим трендом $z500$. Области этих значимых трендов, однако, находятся в удалении от областей абсолютных максимумов аномалий $z500$, характеризующих эти режимы, т.е. характерная структура режимов сохраняется в течение исследуемого периода. Несмотря на довольно высокую межгодовую изменчивость (в отдельные годы повторяемость

некоторых режимов может достигать нуля, т.е. они вообще не встречаются), сезонная повторяемость не имеет значимых линейных трендов. Многолетняя повторяемость и характерные структуры режимов достаточно устойчивы.

Финансирование. Анализ режимов циркуляции выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-577), исследование структуры погодных режимов проводилось при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-934), анализ экстремальных погодных аномалий выполнен при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-17-00242).

Список литературы

1. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Glob. Planet. Change*. 2011. V. 77, N 1–2. P. 85–96.
2. Corti S., Molteni F., Palmer T.N. Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes // *Nature*. 1999. V. 398, N 6730. P. 799–802.
3. Barnston A.G., Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Weather Rev.* 1987. V. 115, N 6. P. 1083–1126.
4. Мохов И.И., Елисеев А.В., Хандорф Д., Петухов В.К., Детлофф К., Вайсхаймер Ф., Хворостянов Д.В. Североатлантическое колебание: диагноз и моделирование десятилетней изменчивости и ее долгопериодной эволюции // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2000. Т. 36, № 5. С. 605–616.
5. Hurrell J.W., Van Loon H. Decadal variations in climate associated with the north Atlantic oscillation // *Clim. Change*. 1997. V. 36. P. 301–326.
6. Курбаткин Г.П., Смирнов В.Д. Межгодовые вариации температуры тропосферы, связанные с декадными изменениями североатлантического колебания // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2010. Т. 46, № 4. С. 435–447.
7. Бардин М.Ю., Платова Т.В. Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связь с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 12. С. 5–19.
8. Robertson A.W., Mechoso C.R., Kim Y.J. The influence of Atlantic sea surface temperature anomalies on the North Atlantic Oscillation // *J. Clim.* 2000. V. 13, N 1. P. 122–138.
9. Jaiser R., Dethloff K., Handorf D., Rinke A., Cohen J. Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation // *Tellus A*. 2012. V. 64, N 1. P. 11595.
10. Monahan A.H., Fyfe J.C., Flato G.M. A regime view of Northern Hemisphere atmospheric variability and change under global warming // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27, N 8. P. 1139–1142.

11. *Fabiano F., Meccia V.L., Davini P., Ghinassi P., Corti S.* A regime view of future atmospheric circulation changes in northern mid-latitudes // *Weather Clim. Dyn.* 2021. V. 2, N 1. P. 163–180.
12. *Huth R., Beck C., Philipp A., Demuzere M., Ustrnul Z., Cahynová M., Kyselý J., Tveito O.E.* Classifications of atmospheric circulation patterns: Recent advances and applications // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2008. V. 1146, N 1. P. 105–152.
13. *Baur F., Hess P., Nagel H.* Kalender der grosswetterlagen Europas 1881–1939. Bad Homburg. 1944. 35 p.
14. *Дзержевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.* Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // *Тр. НИУ ГУГМС. Л.: Гидрометиздат, 1946. 80 с.*
15. *Вангенгейм Г.Я.* Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики // *Тр. ААНИИ.* 1952. Т. 34. 314 с.
16. *James P.M.* An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe // *Theor. Appl. Climatol.* 2007. V. 88, N 1. P. 17–42.
17. *James P.M.* An assessment of European synoptic variability in Hadley Centre Global Environmental models based on an objective classification of weather regimes // *Clim. Dyn.* 2006. V. 27, N 2. P. 215–231.
18. *Kyselý J., Huth R.* Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods // *Theor. Appl. Climatol.* 2006. V. 85, N 1. P. 19–36.
19. *Grotjahn R., Black R., Leung R., Wehner M.F., Barlow M., Bosilovich M., Gershunov A., Gutowski Jr. W.J., Gyakum J.R., Katz R.W., Lee Y.-Y., Lim Y.-K., Prabhath.* North American extreme temperature events and related large scale meteorological patterns: A review of statistical methods, dynamics, modeling, and trends // *Clim. Dyn.* 2016. V. 46, N 3. P. 1151–1184.
20. *Philipp A., Della-Marta P.M., Jacobeit J., Fereday D.R., Jones P.D., Moberg A., Wanner H.* Long-term variability of daily North Atlantic–European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering // *J. Clim.* 2007. V. 20, N 16. P. 4065–4095.
21. *Santos J.A., Corte-Real J., Leite S.M.* Weather regimes and their connection to the winter rainfall in Portugal // *Int. J. Climatol.* 2005. V. 25, N 1. P. 33–50.
22. *van der Wiel K., Bloomfield H.C., Lee R.W., Stoop L.P., Blackport R., Screen J.A. Selten F.M.* The influence of weather regimes on European renewable energy production and demand // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14, N 9. P. 094010.
23. *Crasemann B., Handorf D., Jaiser R., Dethloff K., Nakamura T., Ukita J., Yamazaki K.* Can preferred atmospheric circulation patterns over the North-Atlantic–Eurasian region be associated with Arctic Sea ice loss? // *Polar Sci.* 2017. V. 14. P. 9–20.
24. *Yao Y., Luo D.* An asymmetric spatiotemporal connection between the Euro-Atlantic blocking within the NAO life cycle and European climates // *Adv. Atmos. Sci.* 2018. V. 35, N 7. P. 796–812.
25. *Yiou P., Nogaj M.* Extreme climatic events and weather regimes over the North Atlantic: When and where? // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 7.
26. *Yiou P., Goubanova K., Li Z.X., Nogaj M.* Weather regime dependence of extreme value statistics for summer temperature and precipitation // *Nonlinear Processes Geophys.* 2008. V. 15, N 3. P. 365–378.
27. *Cattiaux J., Vautard R., Cassou C., Yiou P., Masson-Delmotte V., Codron F.* Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, N 20.
28. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hylm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049.
29. *Michelangeli P.A., Vautard R., Legras B.* Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity // *J. Atmos. Sci.* 1995. V. 52, N 8. P. 1237–1256.
30. *Cassou C.* Intraseasonal interaction between the Madden–Julian oscillation and the North Atlantic Oscillation // *Nature.* 2008. V. 455, N 7212. P. 523–527.
31. *Fabiano F., Christensen H.M., Strommen K., Athanasidis P., Baker A., Schiemann R., Corti S.* Euro-Atlantic weather regimes in the PRIMAVERA coupled climate simulations: Impact of resolution and mean state biases on model performance // *Clim. Dyn.* 2020. V. 54, N 11. P. 5031–5048.
32. *Strommen K., Mavilia I., Corti S., Matsueda M., Davini P., von Hardenberg J., Vidale P.-L., Mizuta R.* The sensitivity of Euro-Atlantic regimes to model horizontal resolution // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46, N 13. P. 7810–7818.
33. *Fereday D.R., Knight J.R., Scaife A.A., Folland C.K., Philipp A.* Cluster analysis of North Atlantic–European circulation types and links with tropical Pacific sea surface temperatures // *J. Clim.* 2008. V. 21, N 15. P. 3687–3703.
34. *Dawson A., Palmer T.N., Corti S.* Simulating regime structures in weather and climate prediction models // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39, N 21.
35. *Straus D.M., Corti S., Molteni F.* Circulation regimes: Chaotic variability versus SST-forced predictability // *J. Clim.* 2007. V. 20, N 10. P. 2251–2272.
36. *Vautard R.* Multiple weather regimes over the North Atlantic: Analysis of precursors and successors // *Mon. Weather Rev.* 1990. V. 118, N 10. P. 2056–2081.
37. *Climate Prediction Center NCEP.* URL: https://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/nao_index.tim (дата обращения: 1.09.2022).
38. *Cassou C., Terray L., Hurrell J.W., Deser C.* North Atlantic winter climate regimes: Spatial asymmetry,

- stationarity with time, and oceanic forcing // J. Clim. 2004. V. 17, N 5. P. 1055–1068.
39. Christidis N., Stott P.A. Changes in the geopotential height at 500 hPa under the influence of external climatic forcings // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42, N 24. P. 10798–10806.
40. Шукуров К.А., Семенов В.А. Характеристики зимних аномалий приземной температуры в Москве в 1970–2016 гг. при сокращении площади морских льдов в Баренцевом море // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2018. Т. 54, № 1. С. 13–27.

B.A. Babanov, V.A. Semenov, M.G. Akperov, I.I. Mokhov, N.S. Keenlyside. Occurrence of winter atmospheric circulation regimes in Euro-Atlantic region and associated extreme weather anomalies in the Northern Hemisphere.

Quantitative estimates of regional features of the frequency distribution of extreme temperature, precipitation, and wind anomalies in the winter months in the extratropical zone of the Northern Hemisphere associated with atmospheric circulation regimes in the Euro-Atlantic sector are obtained. Using the *k*-means cluster analysis for the daily geopotential height fields from the ERA5 reanalysis for 1979–2021 four winter atmospheric circulation regimes are identified in the Euro-Atlantic sector corresponding to the North Atlantic Oscillation (NAO) in the positive (NAO+) and negative (NAO–) phases, Scandinavian blocking (SCAND), and regime with anomalously high pressure over the North Atlantic and low pressure over Europe (ATL). Characteristic fields and frequencies of occurrence of the regimes are analyzed. The NAO+ and NAO– regimes turned out to be asymmetric in the spatial structure with significantly different frequencies of occurrence (33% and 19%, respectively). Spatial distributions of the frequencies of occurrence of extreme weather anomalies associated with the regimes are also asymmetric. For all regimes, an asymmetric frequency of occurrence of positive and negative temperature anomalies is noted. During the period under study, no statistically significant trends in the seasonal frequency of the regimes and no large areas with statistically significant trends in the average seasonal fields of the regimes near the areas of geopotential height anomalies maxima are found, which can indicate the stability of these regimes under recent climate changes.

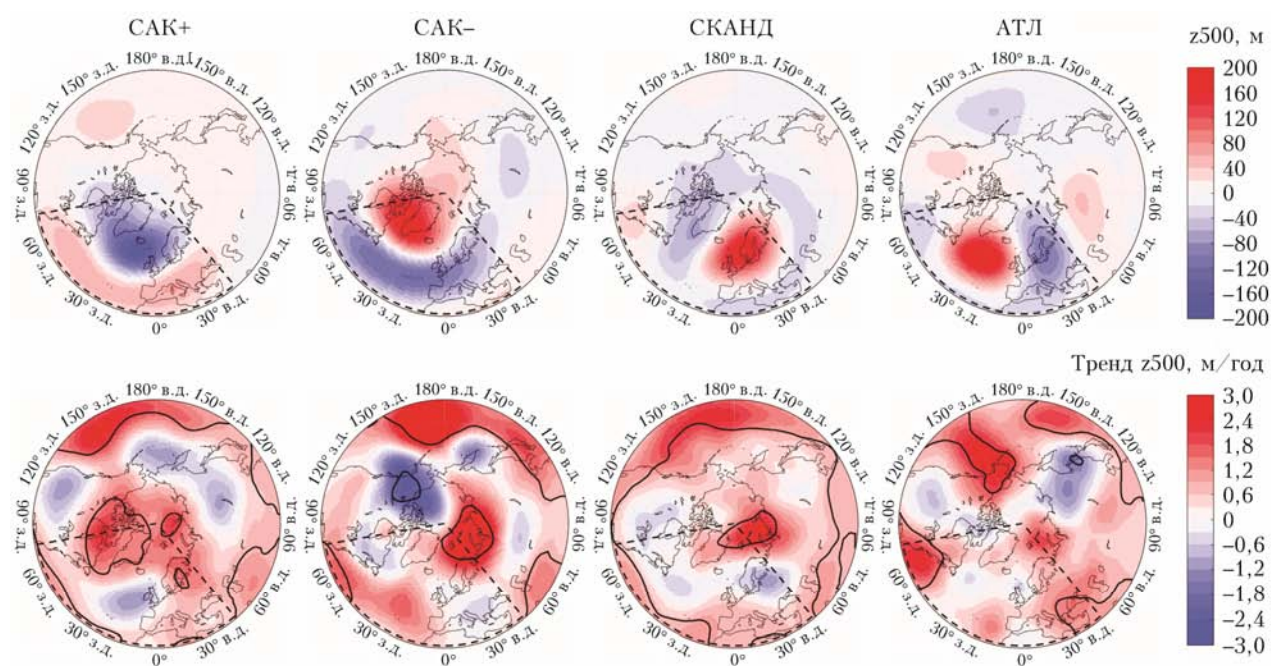


Рис. 1. Средние за 1979–2021 гг. поля (верхний ряд) и тренды средних сезонных полей (нижний ряд) аномалий высоты геопотенциала на уровне 500 гПа зимних режимов в Евро-Атлантическом регионе по ERA5: черная полужирная кривая – области трендов, значимых на уровне 95%; пунктирная кривая – границы региона

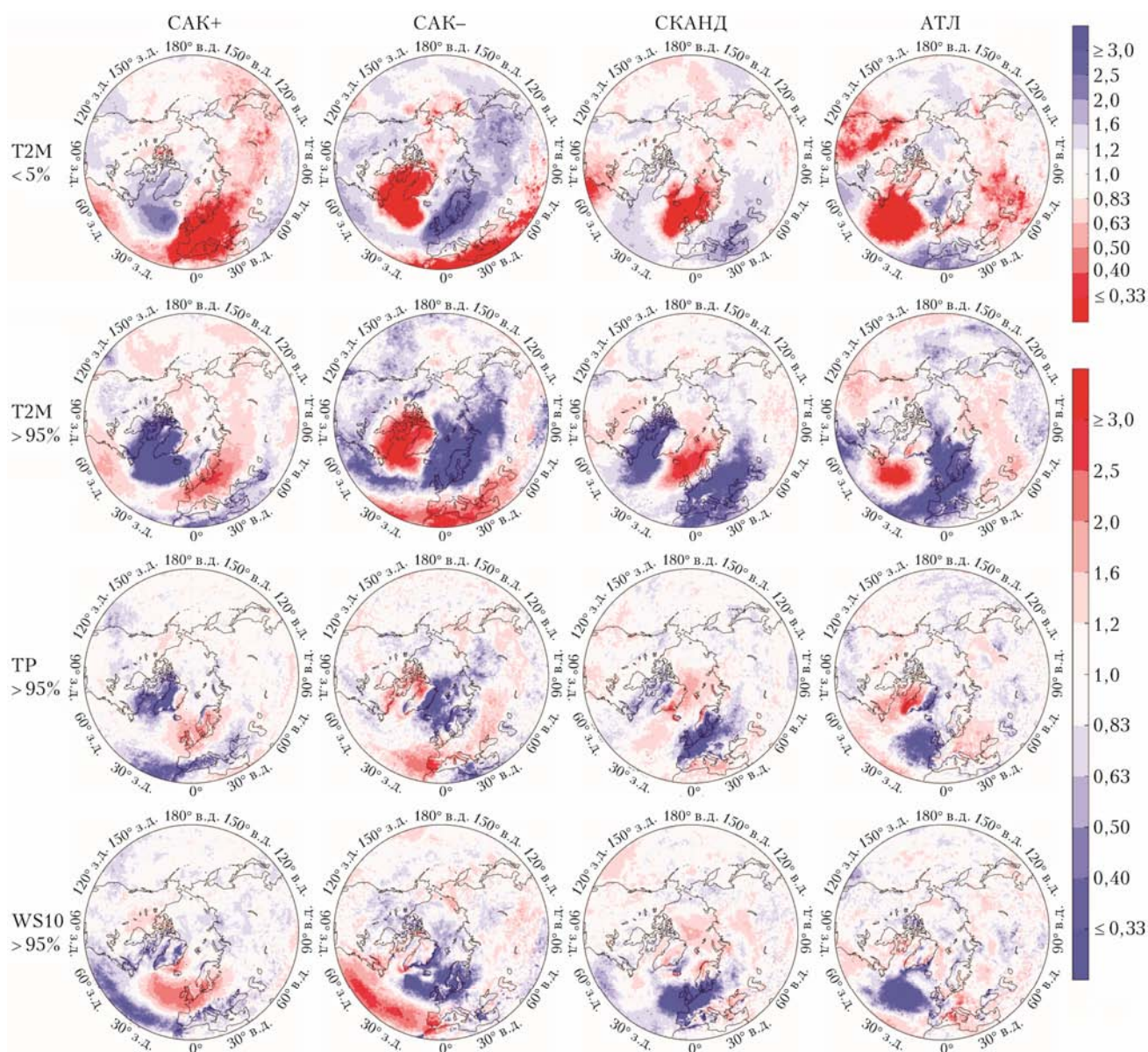


Рис. 3. Связанная с режимами повторяемость зимних экстремальных аномалий T2M, TP, WS10 по ERA5 за 1979–2021 гг. Верхний ряд – повторяемость аномалий T2M ниже 5% – «холодные дни», цвета на картах и шкале первого ряда инвертированы (синий – чаще). Со 2-го по 4-й ряд: повторяемость аномалий выше 95-го перцентиля, общая шкала, единицы измерений на шкалах – отношение наблюдаемой частоты экстремальных событий в данной точке к ожидаемой частоте (см. формулу (1))