

Волны холода в Европейской части России: структура, циркуляционные условия и изменения сезонных статистик

М.Ю. Бардин^{1),2),3)}, Т.В. Платова¹⁾*

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 206;

²⁾ Институт географии Российской академии наук,
РФ, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

³⁾ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

*Адрес для переписки: mick-bardin@yandex.ru

Реферат. Рассматривается статистика, структура и изменчивость крупномасштабных волн холода в различных широтных зонах европейской части России (ЕЧР) в зимний и летний сезоны. Наибольшее количество волн наблюдается зимой на юге ЕЧР, а летом на севере. Вклад в суммарную сезонную продолжительность наиболее длительных волн (более 12 дней) наблюдается зимой на севере (>40%); летом в центре и на юге ЕЧР не наблюдается волн такой продолжительности. Зимние волны холода во всех зонах характеризуются областями отрицательной аномалии температуры, охватывающими почти всю территорию России, с центрами в соответствующей зоне ЕЧР и простирающимися на восток до 140° в.д. Летние волны имеют структуру триполю с очагами холода над ЕЧР – западом Западной Сибири и над Якутией, и положительной аномалией на востоке Западной – западе Средней Сибири. Обсуждаются циркуляционные структуры в тропосфере, сопровождающие волны холода, и их роль в формировании аномалий температуры. Зимой поля геопотенциала H500 при волнах в центре и на юге ЕЧР характеризуются мощным гребнем над севером ЕЧР и Скандинавским полуостровом (что соответствует Скандинавской моде атмосферной циркуляции) и ложбиной на юге ЕЧР – Западной Сибири. Волны холода в северной зоне происходят при гребне на севере Атлантики и ложбине на юге (отрицательная фаза Североатлантического колебания) и ложбине на севере ЕЧР. Летние волны холода во всех зонах сопровождаются отсеченным циклоном с центром в соответствующей зоне (для волн юга ЕЧР – немного севернее); отрицательная аномалия геопотенциала над ЕЧР соответствует отрицательной фазе моды Восточная Атлантика – Запад России (ВАЗР). В рядах сезонной продолжительности волн

в течение 20-го – первых двух десятилетий 21-го столетий наблюдается выраженная долгопериодная изменчивость с временными масштабами около десятилетия и несколько десятилетий. Летом с середины 1970-х годов наблюдается нисходящий тренд сезонной продолжительности волн холода во всех зонах ЕЧР, особенно значительный (в смысле вклада в общую изменчивость) на юге. Зимой нисходящий (незначимый) тренд наблюдается только для волн на севере. На юге и, особенно, в центре суммарная продолжительность волн холода растет с 1990-х до конца 2000-х. Обсуждается связь такого поведения суммарной продолжительности зимних волн с изменениями ведущих циркуляционных мод атлантико-европейского сектора.

Ключевые слова. Волны холода, структура, аномалия температуры, атмосферная циркуляция, изменчивость.

Cold waves over the European part of Russia: structure, circulation conditions and changes in seasonal statistics

M. Yu. Bardin^{1),2),3)}, T. V. Platova¹⁾*

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
Russian Federation, 20b, Glebovskaya str., 107258 Moscow

²⁾Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
Russian Federation, 29, Staromonetnyi lane, 119017 Moscow

³⁾Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
Russian Federation, 3, Pyzhevskii lane, 119017 Moscow

*Correspondence address: *mick-bardin@yandex.ru*

Abstract. The statistics, structure and variability of large-scale cold waves in different latitudinal zones of the European part of Russia (ER) in winter and summer are considered. The largest number of waves is observed in winter in the south of the ER, and in summer in the north. The contribution to the total seasonal duration of the longest waves (more than 12 days) is observed in winter in the north (>40%); in summer, in the center and in the south of the ER, waves of such duration are not observed. Winter cold waves in all zones are characterized by areas of negative temperature anomalies covering almost the entire territory of Russia, with centers in the corresponding zone of the ER and extending eastward to 140°E.

Summer waves have a tripole structure with cold centers over the ER – the west of Western Siberia, and over Yakutia, while a positive anomaly in the east of Western – the west of Central Siberia. The circulation structures in the troposphere accompanying cold waves and their role in the formation of temperature anomalies are discussed. In winter, the H500 geopotential fields accompanying the waves in the center and south of the ER are characterized by a strong ridge over the north of the ER and the Scandinavian Peninsula (which corresponds to the Scandinavian atmospheric circulation mode) and a baric trough in the south of the ER – Western Siberia.

Cold waves in the northern zone occur with a ridge in the north of the Atlantic and a trough in the south (negative phase of the North Atlantic Oscillation) and a trough in the north of the ER. Summer cold waves in all zones are accompanied by a cut-off cyclone with a center in the corresponding zone (for waves in the south of the ER, a little to the north); the negative anomaly of the geopotential over the ER corresponds to the negative phase of the East Atlantic – Western Russia (EAWR) mode. A pronounced long-term variability with time scales of about a decade and of several decades is found in the seasonal duration of waves during the 20th – the first two decades of the 21st centuries. In summer, since the mid-1970s, a downward trend in the seasonal duration of cold waves has been observed in all zones of the ER, especially significant (in terms of contribution to the total variability) in the south. In winter, a downward (insignificant) trend is observed only for waves in the north. In the south, and especially in the center, the total duration of cold waves has been increasing from the 1990s to the end of the 2000s. The connection between this behavior of the total duration of winter waves and changes in the leading circulation modes of the Atlantic-European sector is discussed.

Keywords. Cold waves, structure, temperature anomaly, atmospheric circulation, variability.

Введение

Изменения статистики экстремальных режимов – одна из ключевых проблем в современных исследованиях изменчивости климата. Однако, в то время, как исследованиям изменений режима экстремально высоких температур (суточные экстремумы, «волны тепла») посвящено множество работ (см., например, библиографию в Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата: IPCC, 2021), изменения на противоположном краю распределения температур изучаются значительно менее интенсивно. В России в последнее десятилетие выполнен ряд работ, в которых рассматривается изменение статистики экстремально низких температур. Обзор работ до 2014 года приведен во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (ОД, 2014).

В статье (Виноградова, 2018) приведена оценка изменений количества, интенсивности и продолжительности волн холода на территории России зимой (декабрь-февраль) для различных периодов с 1961 до 2010 г. Хлебникова и Салль (2018) анализируют особенности изменения и изменчивости сезонных экстремумов (с квантильными порогами редкой повторяемости и использованием обобщенного распределения экстремальных значений – GEV) температуры воздуха холодного периода года по данным наблюдений на территории России, начиная с середины 20 столетия; обсуждается важное значение оценок трендов показателей экстремальности для задач климатического обслуживания. (Мирвис и др., 2022) дают краткий анализ результатов исследований отрицательных аномалий температуры воздуха в зимний

период в Северном полушарии; обсуждаются причины их формирования и возможная связь с усилением потепления климата в Арктике в последние десятилетия. Имеется также ряд региональных исследований различных аспектов, связанных с волнами холода: (Григорьева, 2019; Козлова, Харламова, 2012; Ефимова и др., 2020).

Понятно, что экстремумы холода с фиксированными порогами должны в процессе глобального потепления становиться реже и в определенной перспективе исчезнуть совсем. Однако, связь статистики экстремальных режимов с изменением средних сезонных температур может быть немонотонной в связи с естественными колебаниями циркуляционных условий их формирования. Так, в (Бардин, Платова, 2019) показано значимое влияние некоторых мод атмосферной циркуляции на повторяемость экстремально низких суточных температур на территории РФ. Поэтому для объяснения наблюдаемых изменений и адекватного прогноза изменений в будущем важно знание этих, сопровождающих волны холода, циркуляционных условий.

Обычно анализируются экстремумы в пунктах (на метеорологических станциях, если используются данные наблюдений, или в узлах сетки, если используются данные реанализа). В настоящей работе принят несколько иной подход: рассматриваются крупномасштабные волны холода, наблюдающиеся в средней суточной температуре целого региона, т. е., охватывающие весь этот регион. Для анализа выбраны регионы, представляющие собой широтные зоны европейской России (условно север, центр и юг). Для таких волн анализируется их статистика в целом за период с начала 20-го столетия, включающая сезонные (зима и лето) число и суммарную продолжительность; изменения этой статистики за весь рассматриваемый период и отдельно в период современного глобального потепления; структура аномалий температуры при волнах холода; сопутствующие условия атмосферной циркуляции: крупномасштабные климатические моды, антициклоническая циркуляция, включая атмосферный блокинг, а также циклоническая активность.

Данные и методы

Рассматриваются крупномасштабные волны холода, проявляющиеся на территории целого региона. Они определяются как непрерывные эпизоды продолжительностью не менее 5 дней, в течение которых средняя суточная температура воздуха, осредненная по выбранному региону, была ниже 10-го процентиля (P_{10}^d). Анализируются волны холода зимнего и летнего сезонов для трех широтных зон европейской части России (ЕЧР): севернее 60°с.ш. («север»), между 50-60°с.ш. («центр») и южнее 50° («юг»).

Алгоритм оценки квантилей ежедневной температуры (Бардин, Платова, 2019) предусматривает предварительное исключение годового хода из температуры за каждый день ($T'(d) = T(d) - eT(d)$), получение оценки процентиля для аномалии $P_{\alpha}T'(d)$ по упорядоченной выборке (за счет включения 2-х предшествующих и 2-х последующих дней) и переход к процентилю самой температуры: $P_{\alpha}T(d) = P_{\alpha}T'(d) + eT(d)$. Годовой ход температуры, а потом и годовой ход

полученной оценки процентиля при этом сглажен, поскольку они содержат значительные выборочные артефакты – межсуточные зубцы. Был использован низкочастотный симметричный цифровой фильтр с точкой отсечки 90 дней.

Данные для анализа были выбраны из массива суточных стационарных температур и сумм осадков, поддерживаемого во ВНИИГМИ-МЦД (Razuvaev et al., 1993; Булыгина и др., 2014): из 518 станций массива для расчета индекса сезонной продолжительности волн холода (NDCW) выбраны наиболее длиннорядные станции (33 на севере, 59 в центре и 27 на юге), позволяющие рассчитать индекс с 1901 г.; для анализа географического распределения аномалий на всей территории РФ – 367 станций с наименьшим числом пропусков. Часть пропусков после 2011 г. были восполнены по срочным данным SYNOP из БД МАКТ Гидрометцентра России.

Для определения циркуляционных механизмов и аномалий температуры воздуха, сопутствующих волнам холода в европейской части России использовался композиционный метод. Данные поля геопотенциала H1000 и H500 получены из массива реанализа NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) за 4 срока (00, 06, 12, 18 UTC) с 1951 года; сетка 2.5x2.5 градуса. Композиты получены как для самого геопотенциала, так и для его отклонений от среднего за 1961–1990 гг.

В работе использовались широко распространенные индексы атмосферной циркуляции, данные которых легко доступны и постоянно обновляются (источник: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>) (Barnston, Livezey, 1987).

Блокирования (квазистационарные антициклонические циркуляции) определялись согласно (Бардин, 2007), как антициклонические ($H^* > 0$) области с замкнутыми изолиниями в поле вихревой компоненты H500: $H^*(f, l, t) = H(f, l, t) - E^{L(t)} H(f, t)$, где f, l, t – широта, долгота, время, $E^{L(t)} H$ – среднее значение геопотенциала на широте f , существующие и мало смещающиеся в течение не менее 5 суток. Последнее означает, что а) расстояние между центрами в последовательные сроки t_1, t_2 не превышает $(r_1 + r_2)/2$, $r = (s/\pi)^{1/2}$ (s – площадь внутри внешней ограничивающей изолинии), и б) за все время существования центр не удаляется более, чем на величину среднего значения радиуса $E^T r$ от среднего положения центра $E^T(f, l_c)$ (E^T – среднее за время существования).

Результаты

Общая характеристика волн холода в северной (от 60°с.ш.), центральной (50–60°с.ш.) и южной (южнее 50°) зонах ЕЧР дана в табл. 1, где представлены статистики числа и сезонной продолжительности волн холода за 70-летний период с 1951 года, для которого далее будут получены структуры аномалии температуры и атмосферной циркуляции. Для каждой широтной зоны суммарная продолжительность волн, как и средняя продолжительность одной волны, больше зимой. Наиболее продолжительные в среднем волны наблюдаются на

севере; средняя продолжительность даже летних волн здесь больше, чем зимних волн в центре (и равна продолжительности зимних волн на юге). Больше всего волн наблюдается на юге зимой (суммарная продолжительность всех волн здесь также наибольшая), а летом здесь было меньше всего волн холода.

Таблица 1. Статистика волн холода различной продолжительности за период 1951-2020гг.
NCW – число волн; NDCW – суммарная продолжительность (дни).

Table 1. Statistics of cold waves of different duration for the period 1951-2020.
NCW is the number of waves; NDCW – total seasonal duration (days)

	Север				Центр				Юг			
продолжи- тельность	зима		лето		зима		лето		зима		лето	
	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW
5-6 дней	13	73	21	114	13	67	17	91	23	126	11	59
7-9	13	101	10	77	8	64	10	75	10	77	7	53
10-12	3	31	2	21	5	56	2	20	6	64	3	30
>12	6	151	2	27	5	70	0	0	5	105	0	0
всего	34	356	34	286	33	257	29	186	44	372	21	142
Ср. про- долж. волны	10.5		8.4		7.8		6.4		8.4		6.8	

Зимой на севере максимальный вклад в суммарную продолжительность волн холода дают самые длинные (>12 дней) волны; в центре примерно равный вклад от коротких (5-6 дней) и длинных волн, а на юге вклад коротких волн заметно больше. Зимой на севере и на юге отмечены сверхдлительные волны (3 недели и более). На севере таких было после 1951 года четыре: в декабре 1955 (23 дня), январе-феврале 1969 (29), январе-феврале 1985 (30), в феврале 1998 (21). На юге две: в январе-феврале 1954 (33 дня) и январе 1972 (22). Интересно, что в центре таких длинных волн не наблюдалось (самая продолжительная – 18 дней в январе 1972, одновременно с южной).

Летом везде максимален вклад коротких волн, а в центре и на юге вообще не наблюдается волн длиннее 12 дней.

На рис. 1 показаны изменения сезонной суммарной продолжительности волн холода с начала 20 столетия. В период современного глобального потепления (начало которого мы относим к середине 1970-х: (Бардин, Ранькова и др, 2020) естественно ожидать уменьшения этой величины. Однако, в зимний сезон значимое (на уровне 5%) уменьшение наблюдается лишь для северной части ЕЧР – весьма быстрое (со средней скоростью около 1.7 дней за десятилетие). В южной части ЕЧР уменьшение величины NDCW за период с 1976 года очень мало и незначимо, причем в период с 2003 по 2012 год наблюдается несколько лет с высокими значениями индекса, что на 13-летней сглаженной кривой проявляется как определенный рост. Сходным образом ведет себя индекс NDCW для центральной части ЕЧР, но повышение в указанный период еще более выражено, так что тренд за период с 1976 года оказывается положительным (хотя и очень малым и незначимым).

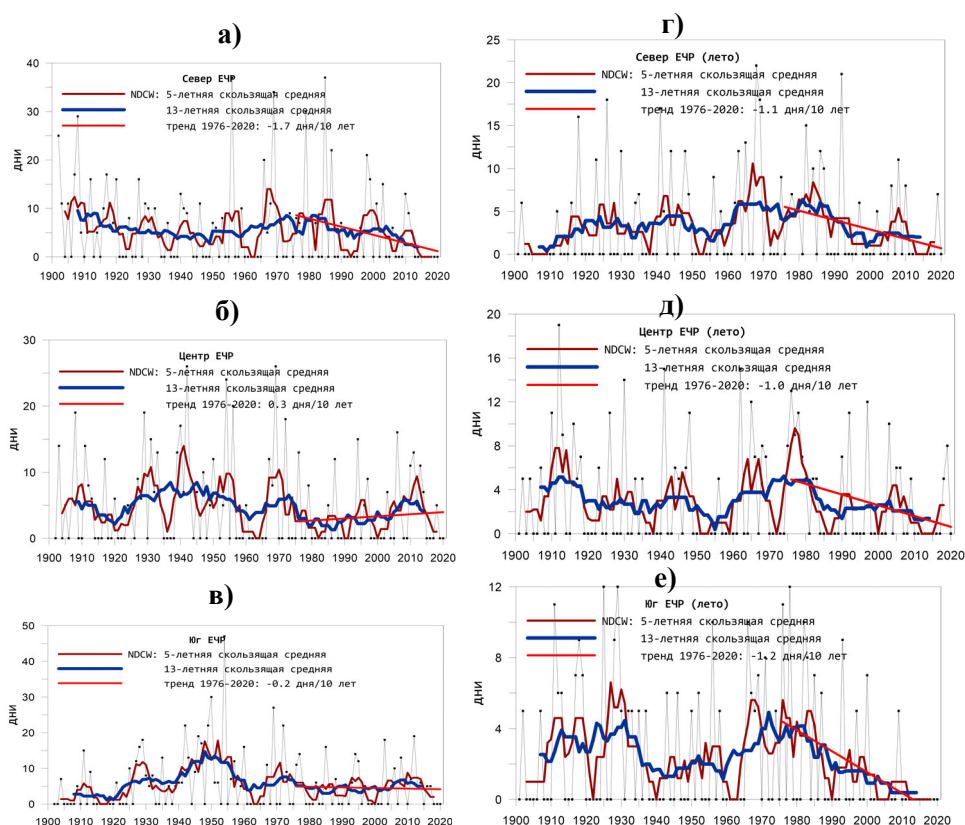


Рисунок 1. Изменения суммарной продолжительности зимних (а, б, в) и летних (г, д, е) волн холода в различных широтных зонах ЕЧР: северной, 60-70°с.ш. (а, г)); центральной, 50-60°с.ш. (б, д); южной, 42-50°с.ш. (в, е).

Figure 1. Changes in the total duration of winter (а, б, в) and summer (г, д, е) cold waves in different latitudinal zones of the ER: northern, 60-70N (а, г); central, 50-60N (б, д); southern, 42-50N (в, е).

Летние (отрицательные) тренды значимы: для южной зоны на уровне 1%, в северной и центральной зонах – на 5%-м уровне. На юге летняя продолжительность волн холода убывает с 1976 года почти монотонно, а после 2000 года наблюдалась единственная непродолжительная волна холода в 2009 году. В северной и центральной зонах за эти 20 лет наблюдались соответственно 5 и 6 волн холода, из них 3 – в период с 2005 по 2010 годы; волны холода наблюдались также и после 2010 года: на севере – в 2019 году, а в центре – в 2018 и 2019 годах.

Потепление первой половины 20 столетия (Груза, Ранькова, 2012; ОД, 2014; Бокучава, Семенов, 2018) зимой проявляется в пониженных значениях NDCW в 1930-е – 1950-е годы только на севере, в то время как в центральной и южной частях ЕЧР, напротив, наблюдаются самые большие сезонные продолжительности волн холода («экстремальные» по этому показателю зимы). Летом последствия этого потепления в 1940-е годы наблюдаются только на юге; на севере и в центре пониженные значения NDCW наблюдаются в 1950-е годы.

На севере и в центральной части выражены колебания с масштабом 1-2 десятилетий (хорошо видны на 5-летней скользящей средней). Зимой на севере они носят почти регулярный характер с периодичностью около 10 лет; в центральной части до 1970 года повторяются все максимумы, наблюдающиеся на севере, кроме одного: во второй половине 1910-х, а затем с 1970 до середины 1990-х наблюдается период с очень низким уровнем индекса, из 24 лет лишь для 5 он отличен от 0. С середины 1990-х до середины 2000-х колебания индекса экстремальности на севере и в центральной части ЕЧР противофазны; но повышенные значения индекса в начале 2010-х наблюдаются в обеих зонах. Изменения индекса экстремальных зим на юге ЕЧР в основном повторяют изменения в центре; но наблюдающиеся в центре два мощных максимума около 1940 г. и в начале 1950-х на юге объединены в общий период высоких значений экстремальности 1940-х – 1950-х. Отметим, что в отдельные годы этого периода волн холода всё же не наблюдалось; вообще, непрерывные периоды с волнами холода не превышали 5 лет, и периодов такой продолжительности было немного: не более двух в каждой зоне (последний отмечен в центре с 2010 по 2014 годы).

В летний сезон также наблюдались выраженные колебания сходного масштаба, но с несколько большим периодом: в среднем около 15 лет. Эти колебания также, как и зимой, наиболее выражены в северной и центральной зоне. Наиболее экстремальные (с высоким NDCW) летние сезоны наблюдались со второй половины 1960-х до второй половины 1980-х годов, в центре и на юге ЕЧР еще в 1910-е, а на юге также и в 1920-е. В отличие от зимы, единственный длительный (более 5 лет) непрерывный период с волнами холода летом отмечался в центре ЕЧР с 1975 по 1980 год. Напротив, отмечены длительные периоды без летних волн холода: например, в первой половине 1950-х на севере и в центре; после 2010 года во всех зонах.

Более подробная характеристика изменений во второй половине 20 века, включающая отдельно изменения для волн различной продолжительности, представлена в табл. 2. В целом суммарная продолжительность волн и их количество уменьшается во всех зонах и зимой, и летом от первой ко второй половине периода 1951-2020гг. Однако, зимой в северной и центральной зонах основной вклад в это уменьшение вносят наиболее длинные волны (>12 дней). На севере всё уменьшение NDCW происходит за счет волн 7-9 дней (37 дней) и >12 дней: 77 дней, т. е., вдвое больше. Однако, число волн в градации 7-9 дней уменьшается на 5, а в длинных волнах – всего на 3 дня. В градациях же коротких (5-6 дней) и средне-длинных (10-12 дней) волн, напротив, происходит рост суммарной продолжительности. На юге же во всех градациях отмечено уменьшение, но основной вклад – в градации 10-12 дней (половина всего уменьшения), а в градации длинных волн – всего 7%. Средние продолжительности волн также уменьшаются во всех зонах: на 20% на севере, 14% в центре и 18% на юге.

Летом также во всех зонах наблюдалось значительное уменьшение как числа волн, так и суммарной продолжительности. Однако, поскольку длинных волн холода (от 10 дней) летом было очень мало, в основном это умень-

шение происходило за счет коротких и средних волн (за исключением юга). На севере за счет 5-6 дневных волн уменьшение составило 73% от суммарного, а в центре за счет 7-9 дневных – практически целиком. На юге же наблюдались в 1951-85 годах три 10-дневных волны, а после 1985 года длинных волн уже не было: это дало большую часть вклада в общее уменьшение: 38%; вклад коротких (5-6 дней) волн – 35%, а средних (7-9 дней) – 27%, так что уменьшение было примерно однородным по градациям (исключая волны длиннее 12 дней, которых просто не было ни в одном из периодов). При этом средняя продолжительность одной волны не изменилась в центре, немного уменьшилась на юге (7%) и увеличилась на севере (на 10%).

Таблица 2. Статистика волн холода различной продолжительности для двух периодов: 1951-1985 и 1986-2020 гг. NCW – число волн; NDCW – суммарная продолжительность (дни). Светло-синим выделены ячейки, где уменьшение NDCW в последний период превысило 30% (дополнительно жирным курсивом – где уменьшение более, чем двукратное); желтым – где одновременно произошло увеличение числа и суммарной продолжительности волн

Table 2. Statistics of cold waves of different duration for two periods: 1951-1985 and 1986-2020.

NCW is the number of waves; NDCW – total seasonal duration (days)

Cells where the decrease in NDCW in the last period exceeded 30% are highlighted light blue (in addition, in bold italics – where the decrease is more than twofold); yellow – where an increase in the number and total duration of waves occurred simultaneously

	Север				Центр				Юг			
продолжи- тельность	1951-1985		1986-2020		1951-1985		1986-2020		1951-1985		1986-2020	
	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW	NCW	NDCW
зима												
5-6 дней	6	33	7	40	6	31	7	36	11	64	12	62
7-9	9	69	4	32	5	39	3	25	6	48	4	29
10-12	1	10	2	21	2	23	3	33	5	54	1	10
>12	5	114	2	37	4	57	1	13	2	55	3	50
всего	21	226	15	130	17	150	14	107	24	221	20	151
Ср. про- долж. волны	10.8		8.7		8.8		7.6		9.2		7.5	
лето												
5-6 дней	15	80	6	34	9	46	8	45	8	43	3	16
7-9	6	47	4	30	8	60	2	15	5	37	2	16
10-12	1	11	1	10	1	10	1	10	3	30	0	0
>12	1	13	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0
всего	23	151	12	88	18	116	11	70	16	110	5	32
Ср. про- долж. волны	6.6		7.3		6.4		6.4		6.9		6.4	

***Географические структуры аномалий температуры
и циркуляционные условия, сопровождающие волны холода***

Зима

Поля аномалии приземной температуры воздуха (ПТВ) при продолжительных (от 7 дней) волнах холода в разных широтных зонах геометрически очень сходны между собой: выраженный центр около 45-50°в.д. Отрицательные изоаномалы растянуты вдоль кругов широты и значительно, примерно вдвое, сильнее на восток: здесь они достигают 140°в.д. (для волн юга ЕЧР – 180°) и охватывают почти всю территорию страны. Основное различие, естественно, широта максимальной по абсолютной величине отрицательной аномалии: она расположена в середине выбранной широтной зоны. Сильно различие по величине максимума: -16.8°С для северных волн, -14.2° для волн в центре, и -12.5° для волн на юге. Однако, сильно сжатая вдоль меридиана область аномалии при волнах на севере охватывает большими отрицательными значениями значительно меньшую часть ЕЧР, чем более слабая в центре область холода при волнах в центре: изоаномала -10° при волнах в центре охватывает почти всю ЕЧР от 45 до 65°с.ш., а при волнах на севере – лишь от 60 до 70°с.ш.; по долготе в обоих случаях она простирается от 27 до 65°в.д., т. е., по всему сектору ЕЧР. Область аномалии < -10°С при южных волнах охватывает по широте те же 10°, что и при северных волнах (44-54°с.ш.), но намного меньший сектор по долготе: 35-52°в.д. При волнах на юге и в центре ЕЧР на арктических островах наблюдаются положительные аномалии до +6°.

Волны холода в центральной и южной части ЕЧР развиваются преимущественно на фоне повышенного давления над Скандинавией, севером ЕЧР, Баренцевом и Норвежским морями при пониженном давлении на юге, а в случае центра ЕЧР – также над Средиземным морем и юго-восточной частью Северной Атлантики. Эта ситуация соответствует положительной фазе Скандинавской моды, и (в особенности для центра ЕЧР) отрицательной фазе САК (Barnston, Livezey, 1987). Ранее авторами было показано, что зимой в отрицательной фазе САК значимо возрастает повторяемость экстремумов холода на севере и, в особенности, на юге ЕЧР, а в положительной фазе СКАНД – на юге и востоке ЕЧР (Бардин, Платова, 2019). В (Бардин, Платова, Самохина, 2019) показано, что при положительной фазе моды СКАНД в центре ЕЧР возрастает антициклоническая активность в целом и (для февралей) повторяемость блокирующих антициклонических циркуляций; последнее, как следует из композита повторяемости блокирований при положительной фазе СКАНД для всех зимних месяцев с отрицательным индексом СКАНД (рис. 5) справедливо также и для зимы в целом: наблюдающаяся при больших отрицательных СКАНД область высокой блокирующей активности в области Сибирского антициклона полностью исчезает, образуется почти такой же интенсивности область с центром на востоке ЕЧР – западе Западной Сибири. Таким образом, аномальные холода над центром ЕЧР при отрицательной фазе СКАНД непосредственно связаны с долгоживущей антициклонической циркуляцией в регионе.

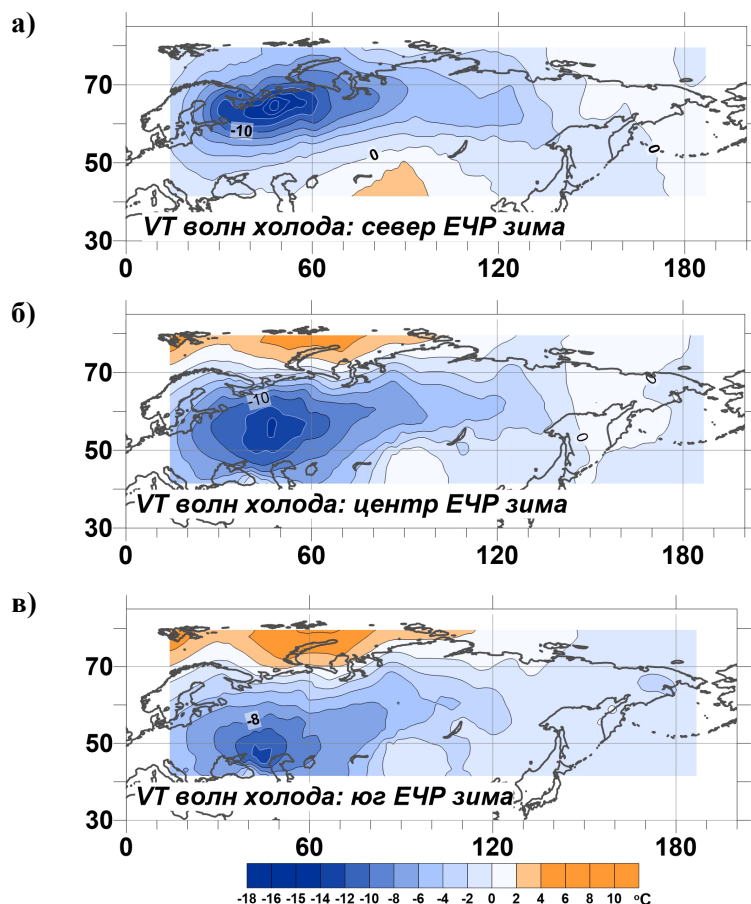


Рисунок 2. Зимние композиты приземной температуры воздуха: средние за даты волн холода зимой длительностью от 7 дней с 1951 по 2020 годы (°C; шаг изолиний 2°). Север ЕЧР (а); центральная часть (б); юг (в)

Figure 2. Composite maps of surface air temperature in winter: averages for the dates of cold waves lasting from 7 days, 1951-2020 (°C; contour interval 2°). Northern EPR (a); central part (б); south (в)

В целом конфигурации полей геопотенциала H500 и аномалий в случае зимних волн холода на юге и в центре ЕЧР очень сходны между собой; одно из различий (распространение аномалий геопотенциала на восток Северной Атлантики при волнах холода в центре) уже упомянуто. Второе – это смещенные на юг на 5-7 градусов области положительной и отрицательной аномалии H500 при волнах холода на юге ЕЧР. Соответственно, ложбина проникает в этом случае южнее, что способствует затоку холодного воздуха в более южные районы. Отметим, что при волнах холода на юге область повторяемости блокирований смещена на запад Скандинавского полуострова (рис. 5в); соответствующее положение оси блокирующего гребня обеспечивает заток холодного воздуха из Норвежского моря на юг ЕЧР (при этом область блокирующей активности в области Сибирского антициклона полностью не исче-

зает, но сильно ослабевает по сравнению с месяцами с высокой отрицательной СКАНД). В случае волн холода на юге, таким образом, основную роль играют не блокирования непосредственно в области формирования волн, а удаленные от нее.

При волнах холода на севере ЕЧР наблюдается совсем другая картина тропосферной циркуляции. В этом случае имеется ложбина на севере ЕЧР, где формируется область пониженного давления, охватывающая на западе Скандинавский полуостров и распространяющаяся далеко на восток. В этой ложбине холодный воздух Арктики проникает на север ЕЧР. На востоке и севере Атлантики формируется мощный гребень, блокирующий западный перенос в атлантическом секторе; совместно с ложбиной на западе Северной Атлантики, распространяющейся далеко на юг и формирующей там область пониженного давления: эта структура определяет отрицательную фазу североатлантического колебания (САК).

Таким образом, в центральной и южной зонах ЕЧР можно ожидать существенного вклада моды СКАНД в развитие волн холода в зимний сезон. В табл. 3 представлены статистики соответствия месяцев с осуществлением волн холода в этой зоне и фазы СКАНД. Очевидно значительное смещение индекса в сторону положительных значений несколько более сильное при волнах на юге, что и следовало ожидать, исходя из формы средних полей аномалии геопотенциала. Конечно, нельзя утверждать, что волны холода обязательно происходят на фоне положительной СКАНД (хотя в случае центральной зоны – более, чем 7 из 10, а на юге – 8 из 10). Однако, необходимо иметь в виду, что здесь речь идет о месячных значениях индекса, в то время, как основная доля волн не превышает 10 дней, так что реально наблюдавшаяся в период волны структура циркуляции «размывается» по всему месяцу; для получения более аккуратной статистики следовало бы работать с суточными индексами, которые недоступны. Их можно было бы получить, используя среднесуточные поля геопотенциала – но это был бы другой набор индексов; в принципе, можно получить суточные индексы, используя как базовые координаты эталоны мод Барнстона-Ливзи: но следует иметь в виду, что ковариационная структура месячных и суточных полей существенно различны, и ортогональности ожидать не приходится; впрочем, она уже была потеряна при уходе от использованной в NOAACPC для идентификации мод выборки 1950-2000гг. Здесь мы не будем делать ни того, ни другого, оставляя месячные индексы и ограничиваясь анализом на качественном уровне: этот анализ, тем не менее, уверенно указывает на наличие предпочтительных для реализации волн холода мод атмосферной циркуляции.

Для волн северной зоны превалирует вклад отрицательной фазы САК (73% всех случаев). В половине оставшихся случаев наблюдается отрицательная фаза СКАНД, так что вместе отрицательные фазы этих двух мод объясняют 86% всех волн холода на севере ЕЧР зимой. Заметный вклад отрицательной СКАНД совместно с рис. 3 показывают, что волны на севере не связаны с долгоживущей антициклонической циркуляцией в регионе. Отрицательная фаза САК блокирует западный перенос и обычное перемещение атлантических

циклонов (Бардин, Платова, Самохина, 2015), а ложбина на севере ЕЧР обеспечивает заток холодного воздуха из Арктики.

Таблица 3. Статистика значений индекса Скандинавской моды $I_{СКАНД}$ в месяцы осуществления волн холода зимой в центральной и южной зонах ЕЧР и индекса САК $I_{САК}$ в месяцы осуществления волн холода зимой в северной зоне. EI – среднее значение индекса по всем месяцам с волнами

Table 3. Statistics of the Scandinavian mode index $I_{СКАНД}$ during the months with cold waves in winter in the central and southern zones of the EPR, and the NAO index I_{NAO} during the months with cold waves in winter in the northern zone. EI is the average index for all months with waves

	$\%I_{СКАНД}>0$	$\%I_{СКАНД}>1$	$\%I_{СКАНД}>2$	$EI_{СКАНД}$
Центральная зона	75	50	20	0.95
Южная зона	81	57	22	1.33
	$\%ICAК<0$	$\%ICAК<-1$	$\%ICAК<-2$	$EICAК$
Северная зона	73	46	23	-0.86

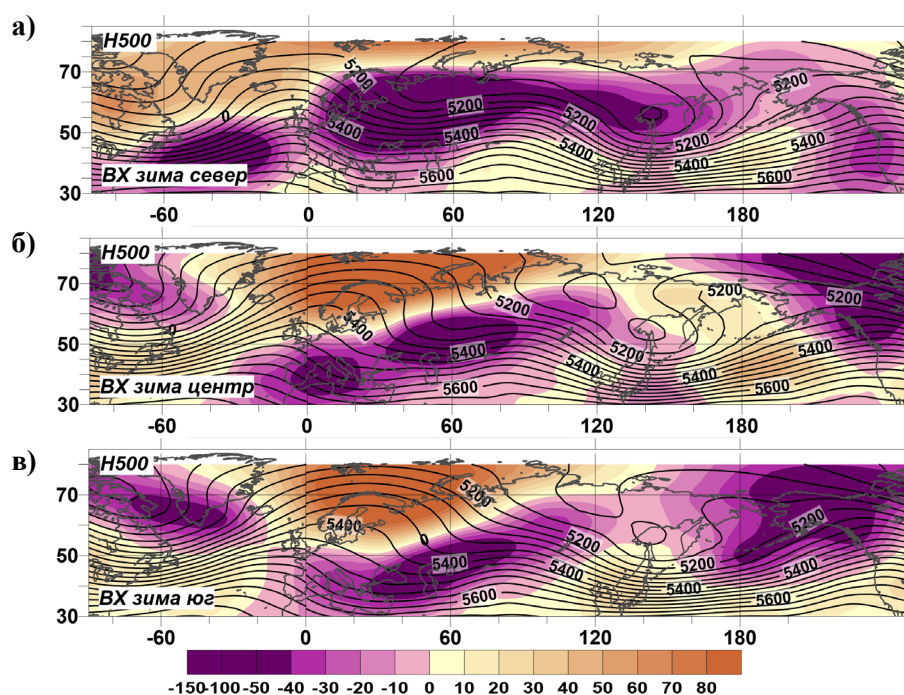


Рисунок 3. Зимние композиты поля геопотенциала H500 (изолинии) и аномалии VH500 (цветная заливка): средние за даты волн холода зимой длительностью от 7 дней с 1951 по 2020 годы (гпм). Север ЕЧР (а); центральная часть (б); юг (в)

Figure 3. Composite maps of 500 hPa geopotential height in winter: averages for the dates of cold waves lasting from 7 days, 1951-2020 (gpm). Northern EPR (a); central part (б); south (в)

Описанные структуры циркуляции, связанные с волнами холода, позволяют качественно объяснить особенности долгопериодных изменений статистики этих волн. В ряде работ (Попова, 2018; Бардин, Платова, 2019; Бардин, Платова, Самохина, 2015) показано, что изменения зимней температуры масштаба десятилетий на территории Северной Евразии тесно связаны с изменениями двух мод: САК и СКАНД. Последние изменяются с середины 20-го столетия в «противофазе»: до 1990-х наблюдается рост индекса САК и убывание СКАНД, что, наряду с вкладом глобального потепления (ассоциирующегося, согласно выводам МГЭИК, в первую очередь с антропогенным ростом концентрации парниковых газов в атмосфере (IPCC, 2021), приводило к ускоренному росту температуры Северной Евразии. Затем индексы САК и СКАНД поменяли знак тенденции, и в период до 2010 года почти на всей территории России кроме крайнего севера наблюдалось похолодание (Бардин, Платова, Самохина, 2015). Соответствующие изменения повторяемости волн холода прослеживаются на рис. 1: они наиболее выражены в центральных регионах, в меньшей степени проявляется на севере, хотя отрицательные значения САК в конце 1990-х - начале 2000-х отразились в росте волн холода в этот период, а быстрый рост САК после 2010 года привел к их полному исчезновению в этой зоне. Тем не менее, довольно слабое убывание продолжительности волн холода на севере на фоне исключительно быстрого потепления в Арктике с середины 1990-х (Доклад, 2022) свидетельствует о значительном вкладе изменений циркуляции.

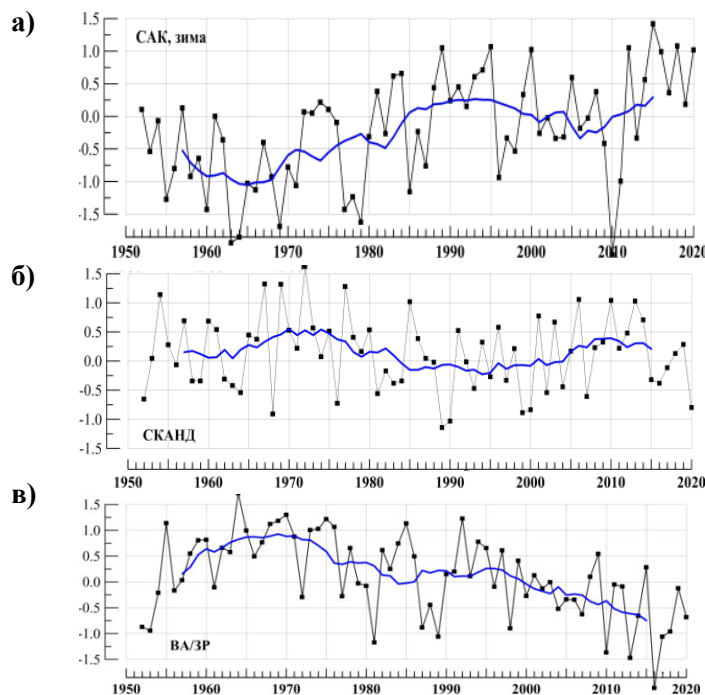


Рисунок 4. Изменения индексов циркуляции САК (а) и СКАНД (б) зимой, ВАЗР (в) летом
Figure 4. Variations of circulation indices in winter: NAO (a) and SCAND (б),
and EA/WR in summer (в).

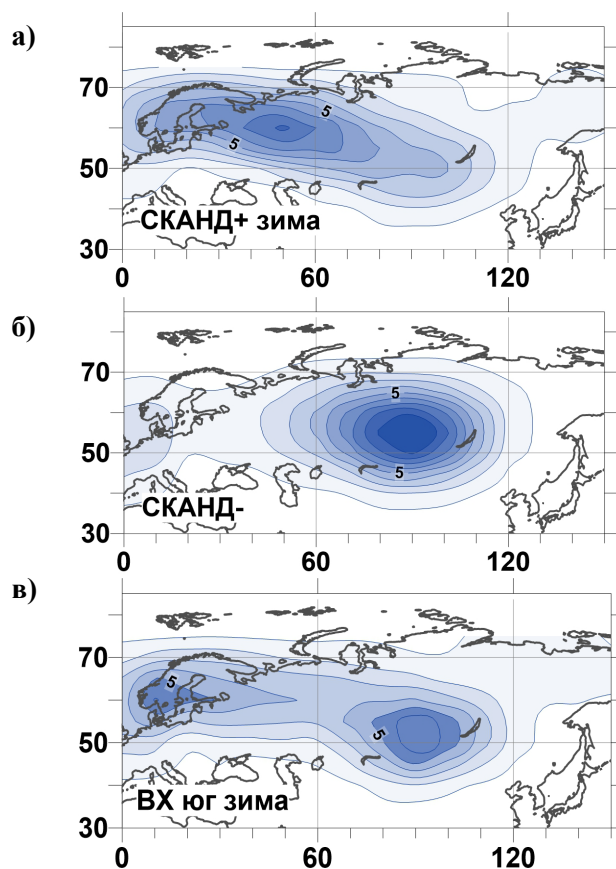


Рисунок 5. Повторяемость (дней/месяц) эпизодов блокирования: (а, б) — зимой в противоположных фазах СКАНД (по 10% месяцев с наибольшими по величине положительными и отрицательными значениями индекса); (в) за даты волн холода зимой длительностью от 7 дней на юге

Figure 5. Frequency (days/month) of blocking episodes in winter in opposite phases of SCAND (10% of the months each with the largest positive and negative index values) (а, б); for dates of cold waves in winter lasting from 7 days in the south (в)

Лето

На рис. 6 показана структура полей аномалии при волнах продолжительностью от 7 дней. Она принципиально отличается от структуры аномалий при зимних волнах: здесь наблюдается «волновая» структура – триполь с холодными центрами в ЕЧР и Восточной Сибири и теплым центром в Западной Сибири, наиболее выраженным при волнах на юге ЕЧР. Центры областей отрицательной аномалии в ЕЧР расположены между 40-50°в.д. в соответствующих широтных зонах, а сами эти области охватывают всю ЕЧР и часть Западной Сибири. Для волн на севере аномалия достигает -7.3°C (Архангельск), для волн в центральной зоне до -6.5°C (Средняя Волга), на юге -5.5°C (Калмыкия). При волнах на юге ЕЧР отрицательные аномалии на

востоке (в Якутии) достигают -3.8°C , а положительные в Западной Сибири $+3.5^{\circ}\text{C}$ (ЯНАО).

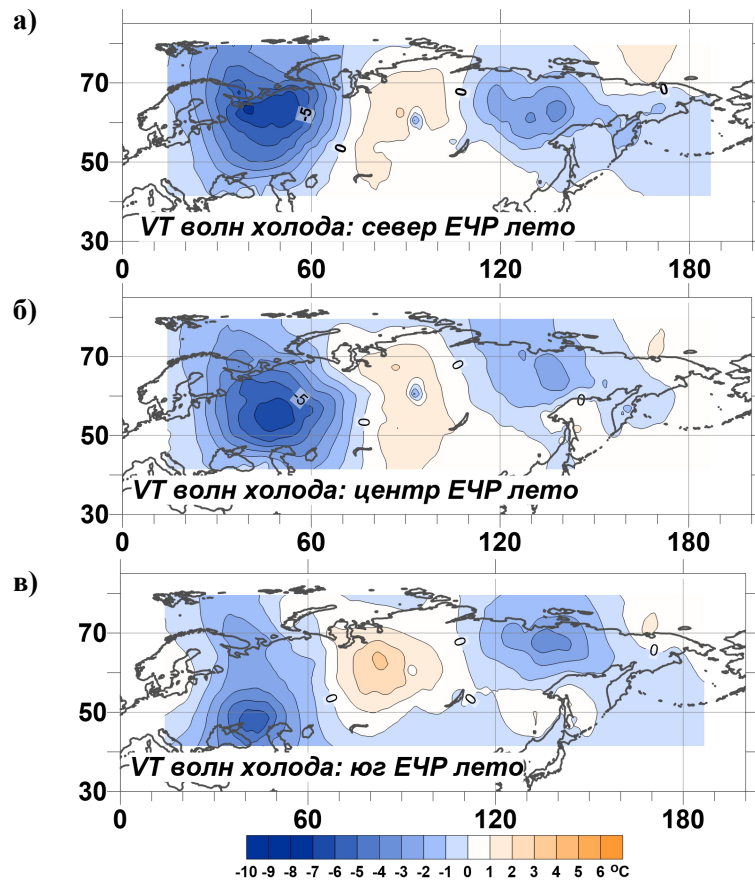


Рисунок 6. То же, что и рисунок 2, для летнего сезона

Figure 6. Same as Figure 2, but for the summer

Тропосферная циркуляция (рис. 7) характеризуется в первую очередь глубокой ложбиной над ЕЧР, причем даже на средней карте наблюдаются замкнутые изогипсы (особенно выраженные для северных волн и волн в центре), т. е., волны холода летнего сезона в основном ассоциируются с малоподвижным отсеченным циклоном над европейской Россией – изолированной холодной воздушной массой, проникшей из полярных в более южные широты (см. статьи *Отсечение*, *Отсеченный циклон* в метеорологическом словаре С.П. Хромова (Хромов, Мамонтова, 1974). Являются ли эти циклоны центральными, т. е. образовавшимся при слиянии серии циклонов (см. там же статью *Центральный циклон*) – требует индивидуального анализа развития волн холода, который планируется в следующей части работы. Гребень на западе особенно силен при волнах на севере и в центре: он охватывает Скандинавию и север Атлантики; при волнах на юге – Скандинавию и северо-запад ЕЧР. Гребень в Западной и Средней Сибири и ложбина в Якутии объясняют отмеченную волнообразную структуру аномалий температуры.

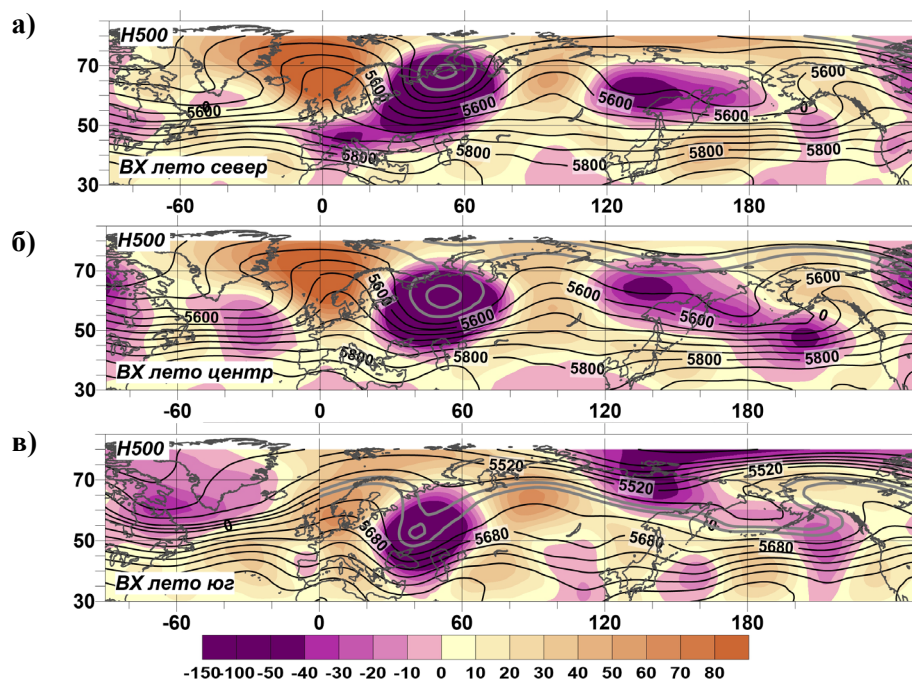


Рисунок 7. то же, что рисунок 3, для летнего сезона

Figure 7. Same as Figure 3, but for the summer

Летом в первую очередь ожидаем для всех зон вклад положительной фазы моды Восточная Атлантика – Запад России (ВАЗР⁺), которая характеризуется отрицательной аномалией давления на ЕЧР (при этом наблюдается пониженная антициклоническая активность на севере, и повышенная циклоническая – на всей территории ЕЧР (Черенкова и др., 2020), а также, на севере и в центре – положительной СКАНД⁺ (положительная аномалия над Скандинавией) и отрицательной САК⁻, а на юге СКАНД⁺ и САК⁺. Для северной зоны ВАЗР⁺ наблюдается для 75% волн холода, а комбинация (ВАЗР⁻, СКАНД⁻, САК⁺) – лишь для 5% волн.

В центральной зоне вклад ВАЗР⁺ – 73%; комбинация (ВАЗР⁻, СКАНД⁻, САК⁺) встречается лишь однажды: это 3% всех случаев.

На юге ВАЗР⁺ наблюдается в 69% случаев. Дополнительный вклад двух других мод невелик: при ВАЗР⁻ одновременно СКАНД⁻ и САК⁻ наблюдаются в 20% случаев, так что суммарно СКАНД⁺ и САК⁺ дают дополнительно лишь 10%.

Показанный на рис. 4в ход изменений летнего индекса ВАЗР свидетельствует о том, что быстрое уменьшение сезонной продолжительности волн холода в разных широтных зонах ЕЧР вызвано не только ростом средней температуры, но и изменением циркуляционных условий: отрицательный тренд индекса ВАЗР ассоциируется, как следует из приведенных выше данных рис.

1 и табл. 2, с уменьшением числа и продолжительности волн холода. Это связано с тем, что при положительных ВАЗР возрастает, а при отрицательных – уменьшается циклоническая активность на территории ЕЧР (рис. 8) и возрастает антициклоническая (Черенкова и др., 2020). Сохранение указанной тенденции ВАЗР может привести к полному исчезновению волн холода, как это наблюдается в настоящее время на юге ЕЧР.

Представляет интерес сравнение циркуляционных условий в случае коротких и более длинных волн. На рис. 8 для волн холода центральной широтной зоны ЕЧР представлены композиты Н1000 для волн продолжительностью 5-6 дней (вверху) и от 7 дней (внизу). В случае длинных волн сформировавшаяся над Скандинавией и севером Атлантики мощная область повышенного давления полностью блокирует обычное перемещение циклонов над Атлантикой и циклогенез в районе Ньюфаундленда, а в случае коротких волн давление в этой области не так велико, и обычный Ньюфаундлендский циклогенез и штормтрек над Атлантикой частично сохраняются. Блокирующая пара гребень на востоке Атлантики – отсеченный циклон над ЕЧР исключают перенос циклонов над Сибирью в случае длинных волн, а в случае коротких волн на севере сохраняются подвижные циклоны, по-видимому, возникающие в Западной Сибири на периферии отсеченного циклона. В положительной фазе ВАЗР циклоническая активность летом усиливается на всей территории ЕЧР, с выделенным районом особо сильного увеличения на севере Западной Сибири (рис. 9), где отмечается максимум циклогенеза в указанном регионе (Горбатенко и др., 2020).

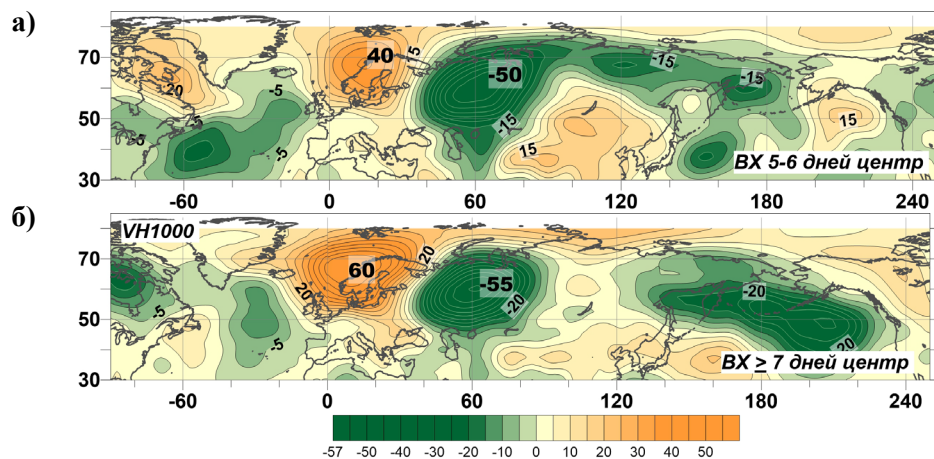


Рисунок 8. Летние композиты поля аномалии геопотенциала VH1000 (цветная заливка) в центральной зоне ЕЧР: средние за даты волн холода длительностью от 5-6 дней (а) и от 7 дней (б) с 1951 по 2020 годы (гпм)

Figure 8. Composite maps of 1000 hPa geopotential height anomaly (VH1000, gpm) in the summer: averages for the dates of cold waves in the central EPR lasting 5-6 days (a), and 7 days or more (b) 1951-2020

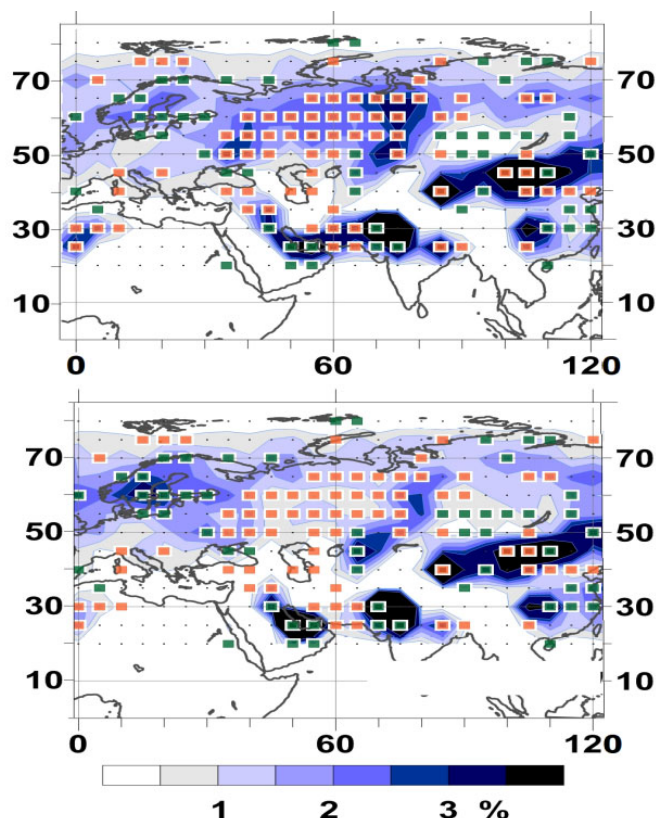


Рисунок 9. Повторяемость циклонов (доля времени с центром циклона над ячейкой сетки $5 \times 5^\circ$, %) летом в положительной и отрицательной фазах ВАЗР (средние за 15% летних месяцев с наибольшими по величине положительными и 15% месяцев – с отрицательными значениями индекса за период 1951-2020 гг.) – цветная заливка

Квадратиками показаны ячейки, где различие повторяемости между фазами значимо на уровне 1%: оранжевые квадратики – повторяемость выше в положительной фазе; зеленые – в отрицательной

Figure 9. The frequency of cyclones (the proportion of time with the center of the cyclone above the $5 \times 5^\circ$ grid cell, %) in the summer in the positive and negative phases of the EA/WR mode (averaged for 15% of the summer months with the largest positive and 15% of the months with negative values of the index for the period 1951-2020) – color scale

Squares indicate cells where the difference in frequency between phases is significant at 1%: orange squares – frequency is higher in the positive phase; green – in the negative

Заклучение

Ожидаемое при глобальном потеплении уменьшение сезонной продолжительности волн холода наблюдается на территории европейской России преимущественно летом (во всех широтных зонах). Зимой более или менее монотонное уменьшение происходит лишь в северной зоне ЕЧР, и оно представляется до начала 2010-х довольно слабым на фоне исключительно быстрого роста зимних температур в арктической зоне с начала 1990-х. В центральной и южной зонах ЕЧР уменьшения по существу не происходит: мало

того, с середины 1990-х очевиден рост, продолжающийся до начала 2010-х. Это обстоятельство связано с долгопериодными изменениями ведущих мод атмосферной циркуляции, на фоне которых формируются волны холода в каждой зоне: для северной зоны это, в основном, Североатлантическое колебание САК, а для центральной и южной – Скандинавская мода (СКАНД). Поведение этих циркуляционных мод в основном объясняет также долгопериодные колебания зимних температур в Северной Евразии (Попова, 2018; Бардин, Платова, Самохина, 2015); однако, как показано в (Бардин, Платова, Самохина, 2019), в похолодании 1990-х - 2000-х важен вклад в среднесезонные температуры аномалий холода, формирующихся при квазистационарной (блокирующей) антициклонической циркуляции в ЕЧР, ассоциирующейся преимущественно с положительной фазой СКАНД.

Летом во всех зонах уменьшение продолжительности волн холода статистически значимо и особенно выражено и практически монотонно в южной зоне; здесь после 2010 года волны холода вовсе не наблюдались. Наряду с ростом средних температур в процессе глобального потепления, важную роль в уменьшении сезонной продолжительности волн холода играет наблюдаемое убывание индекса ВАЗР, в положительной фазе которого над ЕЧР наблюдается область пониженного давления и образуются долгоживущие отсеченные циклоны, на фоне которых формируются волны холода. Неясно происхождение всплеска волн холода в 2000-х в центре и, особенно, на севере ЕЧР.

Таким образом, в наблюдаемых изменениях продолжительности волн холода играют изменения статистики ведущих мод атмосферной циркуляции. Для зимнего периода их влияния очевидны, а летом они потенциально усиливают влияние глобального потепления, так что обнаружить влияние циркуляции визуально затруднительно. Эти влияния следует иметь в виду в климатологической практике для целей климатического обслуживания, но, к сожалению, результаты климатического моделирования с применением современных моделей МОЦАиО бесполезны для прогнозирования естественных колебаний климата масштаба десятилетий; нет даже согласия по поводу наличия связанных с глобальным потеплением тенденций изменения статистики основных мод циркуляции. Поэтому для количественной оценки относительного вклада потепления и циркуляции нужна статистическая модель, подобная использованной в (Бардин, Платова, Самохина, 2019) для оценки тренда зимней температуры на фоне естественных колебаний САК и СКАНД, а для оценки изменений самих циркуляционных мод на масштабах 1-3 десятилетий – авторегрессионные (динамико-стохастические) модели (Бардин, 2011). Мы предполагаем развитие этой тематики в продолжении настоящей работы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Росгидромета (*тема 3.2 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга»*), РНФ (19-

17-00242-П «Опасные погодно-климатические явления на территории России в условиях глобальных изменений климата»), Государственного задания ИГ РАН «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» AAAA-A19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

Список литературы

Бардин, М.Ю. (2007) Антициклоническая квазистационарная циркуляция и ее влияние на аномалии и экстремумы температуры воздуха в западных областях России, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 5-18.

Бардин, М.Ю. (2011) Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов России до 2030 г. с использованием эмпирических стохастических моделей климата, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 5-20.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2015) Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 14-40.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В. (2019) Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связи с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-15.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2019) Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 32-58.

Бардин, М.Ю., Ранькова, Э.Я., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф., Корнева, И.А. (2020) Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 29-45.

Бокучава, Д.Д., Семенов, В.А. (2018) Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 28-51.

Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Александрова, Т.М. (2014) Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR), *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942*, 2014, URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>

Виноградова, В.В. (2018) Зимние волны холода на территории России со второй половины XX века, *Известия РАН, Серия географическая*, № 3, с. 37-46.

Горбатенко, В.П., Тунаев, Е.Л., Пустовалов, К.Н., Волкова, М.А., Нечепуренко, О.Е. (2020) Изменения циклогенеза над Западной Сибирью в 1976-2017 гг., *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 35-57.

Григорьева, Е.А. (2019) Волны холода: подходы к определению и примеры для Хабаровска, *Региональные проблемы*, т. 22, № 3, с. 24-37.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., (2012) *Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России*, Изд. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 198 с., ISBN 978-5-901579-35-0.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год, Росгидромет, Москва, 110 с.

Ефимова, Ю.В., Бабич, Я.Б., Неелова, Л.О., Еремина, Н.С., Мханна, А.И.Н., Лаврова, И.В. (2020) Особенности изменения синоптических процессов, формирующих волны холода в г. Санкт-Петербурге в зимний период, *Навигация и гидрография*, № 60, с. 80-88.

Козлова, Д.С., Харламова, Н.Ф. (2012) Динамика волн холода и тепла за 1959-2005 гг. в Барнауле, *География и природопользование Сибири*, № 14, с. 65-70.

Мирвис, В.М., Мелешко, В.П., Говоркова, В.А., Байдин, А.В. (2022) Аномальные режимы погоды зимой и летом на территории России в XXI веке по данным модельных расчетов СМIP6, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 14-26.

ОД (2014) *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. Катцова, В.М., Семенова, С.М., М., Росгидромет, 1008 с.

Попова, В.В. (2018) Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 84-111.

Ранькова, Э.Я. и др. (2022) Статистическая климатология: современные достижения и новые идеи (Научные чтения памяти Георгия Вадимовича Груза), *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 5-50, doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-5-50.

Хлебникова, Е.И., Саль, И.А. (2018) Экстремально низкие значения температуры воздуха на территории России и риски критических температурных воздействий на объекты инфраструктуры, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 41-51.

Хромов, С.П., Мамонтова, Л.И. (1974) *Метеорологический словарь*, Гидрометеиздат, Ленинград, 1974, 568 с.

Черенкова, Е.А., Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Семенов, В.А. (2020) Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-19.

Barnston, A.G., Livezey, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low - frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115, pp. 1083-1126.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 77, pp. 437-471.

IPCC (2021) *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, in press, doi:10.1017/9781009157896.

Razuvaev, V.N., Apasova, E.G. and Martuganov, R.A. (1993) *Daily Temperature and Precipitation Data for 223 USSR Stations, Oak Ridge, TN*, Carbon Dioxide Information Data Center, Oak Ridge National Lab., ORNL/CDIAC-56, NDP-040, ESD Publ. No. 4194, 47 p. + Appendices.

References

Bardin, M.Yu. (2007) Antitsiklonicheskaya kvazistatsionarnaya tsirkulyatsiya i yeye vliyaniye na anomalii i ekstremumy temperatury vozdukha v zapadnykh oblastiakh Rossii. [Anticyclonic quasi-stationary circulation and its influence on air temperature anomalies and extremes in the western regions of Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 5-18.

Bardin, M.Yu. (2011) Stsenarnyye prognozy izmeneniya temperatury vozdukha dlya regionov Rossii do 2030 g. s ispol'zovaniyem empiricheskikh stokhasticheskikh modeley klimata [Scenario forecasts of air temperature changes for Russian regions until 2030 using empirical stochastic climate models], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 4, pp. 5-20.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2015) Osobennosti izmenchivosti tsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya, svyazannyye s vedushchimi modami atmosfery tsirkulyatsii v Atlantiko-Yevropeyskom sektore. [Features of cyclonic activity variability in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere associated with the leading atmospheric circulation modes in the Atlantic-European sector], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 14-40.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V. (2019) Dolgoperiodnyye variatsii pokazateley ekstremal'nosti temperaturnogo rezhima na territorii Rossii ikh svyazi s izmeneniyami krupnomasshtabnoy atmosfery tsirkulyatsii i global'nyim potepleniyem.[Long-term variations in the indicators of extremeness of the temperature regime in Russia and their relationship with changes in large-scale atmospheric circulation and global warming], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-15.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2019) *Izmenchivost' antitsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh Severnogopo lushariya* [Variability of anticyclonic activity in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 3, pp. 32-58.

Bardin, M.Yu., Ran'kova, E.YA., Platova, T.V., Samokhina, O.F., Korneva, I.A. (2020) *Sovremennyye izmeneniya prizemnogo klimata po rezul'tatam regul'yarnogo monitoringa* [Modern changes in the surface climate based on the results of regular monitoring], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 29-45.

Bokuchava, D.D., Semenov, V.A. (2018) *Analiz anomal'iy prizemnoy temperatury vozdukha v Severnom polusharii v techeniye KHKH veka po dannym nablyudeniy i reanalizov* [Analysis of surface air temperature anomalies in the Northern Hemisphere during the 20th century based on observations and reanalyses], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 28-51.

Bulygina, O.N., Razuvayev, V.N., Aleksandrova, T.M. (2014) *Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR)* [Description of the dataset of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR)], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620942, 2014*.

Vinogradova, V.V. (2018) *Zimniye volny kholoda na territorii Rossii so vtoroy poloviny KHKH veka* [Winter cold waves in Russia from the second half of the XX century], *Izvestiya RAN, Seriya geograficheskaya*, no. 3, pp. 37-46.

Gorbatenko, V.P., Tunayev, Ye.L., Pustovalov, K.N., Volkova, M.A., Nepochurenko, O.Ye. (2020) *Izmeneniya tsiklogeneza nad Zapadnoy Sibir'yu v 1976-2017 gg.* [Changes in cyclogenesis over Western Siberia in 1976-2017], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 35-57.

Grigor'yeva, Ye.A. (2019) *Volny kholoda: podkhody k opredeleniyu i primery dlya Khabarovska* [Cold Waves: Definition Approaches and Examples for Khabarovsk], *Regional'nyye problemy*, vol. 22, no. 3, pp. 24-37.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.YA., (2012) *Nablyudayemyye i ozhidayemyye izmeneniya klimata Rossii* [Observed and expected climate changes in Russia], Izd. FGBU «VNIIGMI-MCD», Russia, 198 p., ISBN 978-5-901579-35-0.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2021 god [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2021], Rosgidromet, Moscow, Russia, 110 p.

Yefimova, Yu.V., Babich, Ya.B., Neyelova, L.O., Yeremina, N.S., Mkhanna, A.I.N., Lavrova, I.V. (2020) *Osobennosti izmeneniya sinopticheskikh protsessov, formiruyushchikh volny kholoda v g. Sankt-Peterburge v zimniy period* [Features of changes in synoptic processes that form cold waves in St. Petersburg in winter], *Navigatsiya i gidrografiya*, no. 60, pp. 80-88.

Kozlova, D.S., Kharlamova, N.F. (2012) Dinamika voln kholoda i teplaza 1959-2005 gg. v Barnaule. [Dynamics of cold and heat waves 1959-2005. at Barnaul], *Geografiya I prirodopol'zovaniye Sibiri*, no. 14, pp. 65-70.

Mirvis, V.M., Meleshko, V.P., Govorkova, V.A., Baydin, A.V. (2022) Anomal'nyye rezhimy po gody zimoy i letom na territorii Rossii v XXI veke po dannym model'nykh raschetov CMIP6 [Abnormal modes weather in winter and summer on the territory of Russia in the 21st century according to CMIP6 model calculations], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 14-26.

OD (2014) *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in Kattsov, V.M., Semenov, S.M. (eds.), Rosgidromet, Moscow, Russia, 1008 p.

Popova, V.V. (2018) Sovremennyye izmeneniya klimata na severe Eurazii kak proyavleniye variatsiy krupnomasshtabnoy atmosfery tsirkulyatsii [Modern climate changes in the north of Eurasia as a manifestation of large-scale atmospheric circulation variations], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 1, pp. 84-111.

Ran'kova, E. YA. i dr. (2022) Statisticheskaya klimatologiya: sovremennyye dostizheniya i novyye idei (Nauchnyye chteniya pamyati Georgiya Vadimovicha Gruza) [Statistical climatology: modern achievements and new ideas (Scientific readings in memory of Georgiy Vadimovich Gruza)], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 1, pp. 5-50, doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-5-50.

Khlebnikova, Ye.I., Sall' I.A. (2018) Ekstremal'no nizkiye znacheniya temperatury vozdukha na territorii Rossii i riski kriticheskikh temperaturnykh vozdeystviy na ob'yekty infrastrukтуры [Extremely low air temperatures on the territory of Russia and the risks of critical temperature effects on facilities], *Meteorolog i ya gidrologiya*, no. 6, pp. 41-51.

Khromov, S.P., Mamontova, L.I. (1974) *Meteorologicheskiy slovar'* [Meteorological Dictionary], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 568 p.

Cherenkova, Ye.A., Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Semenov, V.A. (2020) Vliyaniye dolgoperiodnoy izmenchivosti temperatury poverkhnosti okeana v Severnoy Atlantike i izmeneniy atmosfery tsirkulyatsii na povtoryayemost' sil'nykh atmosferynykh zasukh letom na yuge Vostochno-Yevropeyskoy ravniny [The influence of long-term variability of ocean surface temperature in the North Atlantic and changes in atmospheric circulation on the frequency of severe atmospheric droughts in summer in the south East European Plain], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-19.

Barnston, A.G., Livezey, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low - frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115, pp. 1083-1126.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 77, pp. 437-471.

IPCC (2021) *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, in press, doi:10.1017/9781009157896.

Razuvaev, V.N., Apasova, E.G. and Martuganov, R.A. (1993) *Daily Temperature and Precipitation Data for 223 USSR Stations, Oak Ridge, TN*, Carbon Dioxide Information Data Center, Oak Ridge National Lab., ORNL/CDIAC-56, NDP-040, ESD Publ. No. 4194, 47 p. + Appendices.

Статья поступила в редакцию (Received): 02.09.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 13.09.2022.

Принята к публикации (Accepted): 16.09.2022.

Для цитирования / For citation:

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В. (2022) Волны холода в Европейской части России: структура, циркуляционные условия и изменения сезонных статистик, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 3, с. 5-30, doi:10.21513/2410-8758-2022-3-5-30.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V. (2022) Cold waves over the European part of Russia: structure, circulation conditions and changes in seasonal statistics, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 3, pp. 5-30, doi:10.21513/2410-8758-2022-3-5-30.