

**Изменения статистики экстремумов
температурного режима в зернопроизводящих регионах
юга Европейской России и Западной Сибири**

М.Ю. Бардин^{1),2),3)}, Т.В. Платова¹⁾, И.О. Попов¹⁾*

¹⁾Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Российская Федерация, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾Институт географии РАН,
Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4

³⁾Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Российская Федерация, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3, стр. 1

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

Реферат. Исследуется статистика некоторых индексов экстремальности средней температуры ряда регионов юга РФ, а именно, сезонной повторяемости региональных температур, превышающих 95-й процентиль и не достигающих 5-го процентиля, а также для волн тепла и холода, их сезонное количество и суммарная продолжительность. Анализируются особенности изменчивости индексов экстремальности для регионов юга европейской части России (ЕЧР) с начала XX столетия, для юга Западной Сибири – с середины 1930-х гг., включая колебания масштаба десятилетий и тенденции изменения в период глобального потепления. Рассматривается структура волн: географическое распределение аномалий температуры воздуха в период осуществления волн на территории Российской Федерации, крупномасштабные циркуляционные условия, сопровождавшие волны тепла и холода, с использованием композитного анализа. В целом структура тропосферной циркуляции для волн тепла юга ЕЧР соответствует отрицательной фазе ведущей циркуляционной моды Восточная Атлантика – Западная Россия (ВАЗР); показано, в частности, что в месяцы осуществления длительных волн тепла над югом ЕЧР статистика индекса ВАЗР значительно смещается в сторону отрицательных значений, которые ассоциируются с положительными аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике; при этом резко возрастает блокирующая антициклоническая активность на территории ЕЧР. Наблюдающийся в последние десятилетия нисходящий тренд индекса ВАЗР и ожидаемый при потеплении рост ТПО усиливают риск засухи в основных зернопроизводящих районах ЕЧР. С другой стороны, на юге Западной Сибири волны тепла реже, менее продолжительны, и максимальные температуры в них в среднем на 2-4°C ниже, чем на юге ЕЧР. Обсуждается возможное использование полученных результатов о различии интенсивности и продолжительности волн тепла и холода и их изменениях для целей выработки рекомендаций по адаптации сельского хозяйства РФ к условиям современного потепления.

Ключевые слова. Глобальное потепление, волны тепла, блокинг, моды атмосферной циркуляции.

Changes in statistics of temperature extremes in crop-yielding regions of southern European Russia and Western Siberia

M.Yu. Bardin^{1),2),3)}, T.V. Platova¹⁾, I.O. Popov¹⁾*

¹⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russian Federation

²⁾ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

³⁾ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevskiy lane, 119017, Moscow, Russian Federation

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

Abstract. The statistics of certain indices of extreme average temperature in some regions of the south of the Russian Federation, namely, the seasonal frequency of regional temperatures exceeding the 95th percentile, and those below the 5th percentile, as well as seasonal number and total duration of heat and cold waves are studied. Specific features in variability of indices, including variations on the decadal scale and trends in the period of global warming are analyzed for the regions of the south of the European Russia (ER) since the beginning of the 20th century, and since the mid-1930s for the south of Western Siberia. The structure of waves is considered: the geographical distribution of air temperature anomalies on the territory of the Russian Federation during the periods of wave existence, large-scale circulation patterns that accompanied heat and cold waves, using a composite analysis. Generally, the structure of the tropospheric circulation associated with heat waves in the south of the ER corresponds to the negative phase of the leading circulation mode East Atlantic – Western Russia (EA/WR); it has been shown, in particular, that the statistics of the EA/WR index is significantly shifted towards negative values for the months with long heat waves over the south of the ER, which, as shown earlier, is associated with positive sea surface temperature (SST) anomalies in the North Atlantic and, in its turn, sharply increased blocking anticyclonic activity in the ER. The downward trend of the EA/WR index observed in recent decades and the increase in SST expected with warming enhance the risk of drought in the main grain-producing regions of the ER. On the other hand, in the south of Western Siberia, heat waves are less frequent, shorter, and the maximum temperatures in them are on average 2-4 degrees lower than in the south of the ER. The possible use of the obtained results on the difference in the intensity and duration of heat and cold waves and their changes for the purpose of developing recommendations for adapting the agriculture of the Russian Federation to the conditions of current warming is discussed.

Keywords. Global warming, heat waves, blocking, atmospheric circulation modes.

Введение

Изменения частоты и интенсивности погодно-климатических экстремумов при глобальном потеплении, по-видимому, более существенны с точки зрения рисков для природных и техногенных систем, чем изменения средне-сезонных температур. В частности, как экстремальные температуры, так и, в особенности, продолжительные волны тепла и холода, могут оказывать неблагоприятные воздействия на сельскохозяйственное производство. Волны тепла, с которыми ассоциируется возникновение засушливых условий, особенно в семиаридных регионах, отрицательно сказываются на урожаях сельскохозяйственных культур. Кроме того, продолжительные периоды жары оказывают значительный негативный эффект на здоровье населения. При этом, как указывается в отчётах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2018; IPCC, 2021), в большинстве регионов суши отмечается рост экстремально теплых температурных режимов, включая волны тепла. Высока вероятность, что экстремальные температуры в XXI веке в ряде регионов будут расти с темпами, значительно превышающими скорость глобального потепления.

Основной причиной наблюдаемых изменений повторяемости и интенсивности температурных экстремумов является глобальное потепление, которое на региональном уровне модулируется крупномасштабной атмосферной циркуляцией. В настоящее время нет достаточного понимания того, как изменения атмосферной динамики при потеплении воздействуют на локализацию и масштаб погодно-климатических экстремумов, ни как потепление воздействует на изменчивость циркуляции (IPCC, 2021). Однако, несмотря на огромную территорию России, а также ключевую роль крупных зернопроизводящих регионов России и их подверженность экстремальным погодно-климатическими явлениям, в 6-м отчете 1-й Рабочей группы МГЭИК (IPCC, 2021) почти нет ссылок на работы российских ученых, а немногие имеющиеся (их всего 4) посвящены экстремальным режимам осадков. В предыдущих работах авторов и их сотрудников, а также в соавторстве с коллегами из других институтов и университетов России, содержатся результаты об изменении повторяемости сезонного числа дней с экстремально высокими и низкими температурами воздуха на станциях европейской части России (ЕЧР) (Бардин, Платова, 2019, 2020; Бардин и др., 2020), Причерноморского региона (Коваленко и др., 2017). В (Бардин и др., 2019; Черенкова и др., 2020) рассмотрена связь блокирующей антициклонической активности с ведущими климатическими модами атлантико-европейского сектора. Связи температуры поверхности океана с атмосферной циркуляцией анализируются в (Семенов, Черенкова, 2018), с экстремальными температурными режимами и засухой в (Семенов и др., 2016; Черенкова и др., 2020; Бардин и др., 2023). В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с крупномасштабными волнами тепла в важнейших зернопроизводящих регионах юга ЕЧР и Западной Сибири.

Данные и методы

Крупномасштабные региональные волны тепла определялись, как достаточно длительные (от 5 дней) эпизоды со средней величиной аномалии температуры крупного региона выше заданного процентильного порога 90%. Для анализа были выбраны следующие крупные регионы: в ЕЧР 42-48°с.ш., 35-50°в.д., включающие Северокавказский, Южный федеральные округа (ФО) и новые регионы России (далее сокращенно СК), 48-54°с.ш., 35-60°в.д. – части Центрального и Приволжского ФО (ЦЧ); в азиатской части России 52-58°с.ш., 62-90°в.д. – юг Западной Сибири (ЮЗС), включая Тюменскую, Омскую, Новосибирскую, Томскую, Кемеровскую области и Алтайский край.

Данные для анализа были выбраны из массива суточных стационарных температур и сумм осадков, поддерживаемого во ВНИИГМИ-МЦД (Булыгина и др., 2014; Razuvaev et al., 1993). Массив содержит данные метеорологических наблюдений средней суточной, минимальной и максимальной температур и суточных сумм осадков 518 станций РФ и небольшого числа станций ближнего зарубежья. Самые длинные ряды начинаются со второй половины XIX века, но таких станций совсем немного; больше станций имеют ряды с начала XX века, в основном в ЕЧР, в азиатской части достаточное для региональных осреднений число станций имеют ряды с 1936 г.

Для расчета индексов сезонного числа волн тепла (NHW) и холода (NCW), сезонной продолжительности волн тепла ($NDHW$) и холода ($NDCW$), числа дней с температурой выше 95-го перцентиля ($ND95$) и ниже 5-го ($ND05$) выбраны станции, имеющие наиболее длинные ряды наблюдений и позволяющие для юга ЕЧР рассчитать эти индексы с 1901 г. (20 для СК, 21 для ЦЧ), а для юга Западной Сибири с 1936 г. – 31 станция. Под 95 (90) перцентилями понимаются значения температуры, выше которых имеется 5% (10%) всей выборки: эти перцентили будем обозначать $P95$ ($P90$). Соответственно, $P05$ ($P10$) – значения температуры, ниже которых имеется 5% (10%) всей выборки.

Для анализа географического распределения аномалии температуры и условий атмосферной циркуляции на поверхности H500, на фоне которых развиваются такие волны, использован композитный метод. Для расчета композитов – условных средних при осуществлении волны тепла в регионе – полей геопотенциала H500 использованы суточные данные реанализа NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) с разрешением 2.5°. Для анализа распределения аномалий температуры на всей территории РФ – данные 367 станций упомянутого архива ВНИИГМИ-МЦД с наименьшим числом пропусков с 1951 года.

Индексы ведущих мод атмосферной циркуляции определены в (Barnston, Livezey, 1987); данные доступны на сайте: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>. В настоящей работе при анализе использованы 4 моды атлантико-европейского сектора. Североатлантическое

колебание (САК), представляет собой диполь в поле давления над Северной Атлантикой с центрами (летом) в районе Исландского минимума – юга Гренландии и у побережья Северной Америки на широте 45-50°. Его положительная (сильная) фаза характеризуется усилением циклонической циркуляции на севере и/или антициклонической циркуляции южнее, что вызывает усиление западного переноса в секторе и вынос холодного атлантического воздуха на континент. В отрицательной фазе наблюдается противоположная картина. Летняя мода Восточная Атлантика – Запад России (ВАЗР) в отрицательной фазе определяется положительными аномалиями давления над ЕЧР и Северной Атлантикой; при этом над ЕЧР резко усиливается антициклоническая блокирующая активность. Скандинавская мода (СКАНД) в положительной фазе определяется повышенным давлением в районе Скандинавии и характеризуется повышенной блокирующей активностью над Норвежским и Северным морями и на севере ЕЧР. Восточно-Атлантическая мода (ВА), по сути, представляет собой такой же диполь, как САК, но смещенный на юго-восток.

Графики временных рядов подготовлены с использованием ПО Golden Software Grapher 8.2; карты-схемы композитов – с использованием Golden Software Surfer 13.0. Метод интерполяции – кригинг; модель вариограммы – линейная; множество влияющих станций ограничено: радиус влияния по широте 5°, по долготе 10°.

Результаты

Юг Западной Сибири

Для Западной Сибири анализировались изменения статистик температурных экстремумов, начиная с 1936 г. (рис. 1), поскольку более ранних данных мало, и они распределены очень неравномерно по региону, так что оценки региональных температур нерепрезентативны.

Всего за период 1936-2021 гг. было 36 летних сезонов с волнами тепла (42%); до 1976 г. только в одном 1969 году было 2 волны: в начале июля – 14 дней, самая длинная наблюдавшаяся волна (волна 13 дней была в 1998 г.) и в конце месяца короткая, 5 дней. Позже в 2012 г. было 3 волны, суммарно 17 дней, и 2 короткие в 2017 г. Экстремальные региональные температуры выше 95 перцентиля *ND95* отмечены для 86% лет.

Определенный рост сезонной продолжительности волн тепла *NDHW* наблюдается в течение всего этого периода, на него накладываются значительные колебания масштаба около двух десятилетий. Оценка скорости роста в период современного потепления с 1976 г. около 0.4 дня за десятилетие, и он статистически незначим: объясняет всего 2% дисперсии. Наблюдающийся после 2000 г. спад и затем выполаживание вероятнее всего являются низкой фазой упомянутых колебаний: около 2010 г., по-видимому, начинается фаза роста.

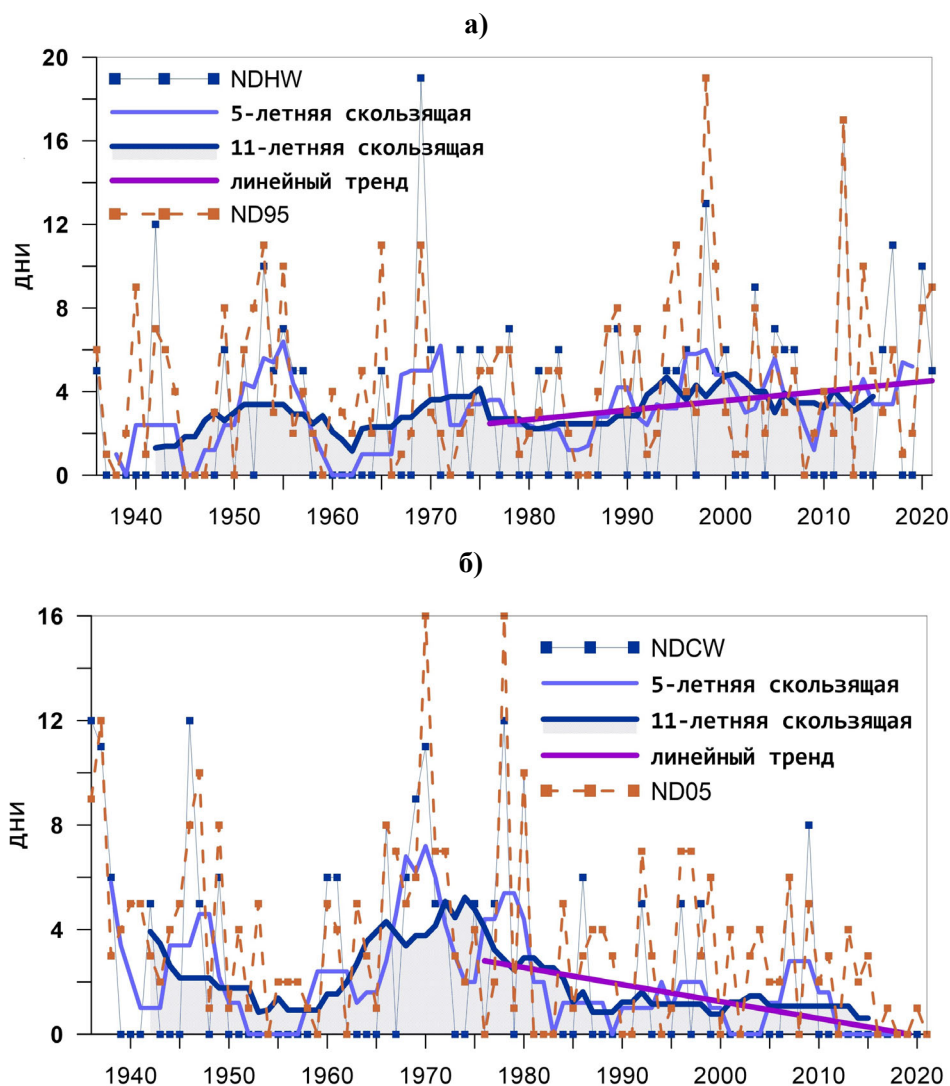


Рисунок 1. Изменения индексов экстремальности температурного режима летнего сезона на юге Западной Сибири

a) сезонная продолжительность региональных волн тепла NDHW (дни); число дней в сезоне со средней температурой выше 95 перцентиля (ND95); б) сезонная продолжительность региональных волн холода NDCW (дни); число дней в сезоне со средней температурой ниже 5 перцентиля (ND05).

Для сезонной продолжительности волн показаны также скользящие 5- и 11-летние средние и линейный тренд за 1976-2021 гг.

Figure 1. Changes in indices of temperature extremes in the summer season in the south of Western Siberia

a) seasonal duration of regional heat waves NDHW (days); number of days in a season with daily average temperature above the 95th percentile (ND95); b) seasonal duration of regional cold waves NDCW (days); number of days in a season with daily average temperature below the 5th percentile (ND05).

For seasonal wave duration, 5- and 11-year moving averages and a linear trend for 1976-2021 are also shown

Очень близкое поведение показывает сезонное число дней с температурой выше 95 перцентиля $ND95$. Надо заметить, что летом эти два индекса довольно тесно связаны, особенно в области крайних градаций (табл. 1). Для всех 12 лет, когда не наблюдалось ни одного дня с $T > P95$, не наблюдалось также и волн тепла (напомним, что принятый порог для волн тепла «умеренный»: $P90$). На противоположном конце распределения из 9 лет с $ND95 \geq 10$ дней только единственным летом 2014 г. не было волн. С другой стороны, для 7 сезонов с волнами большой продолжительности (≥ 10 дней) $ND95$ в среднем равно 11.3 (и в каждом из этих сезонов не менее 7). Представляется очень вероятным, что такие длинные волны всегда достигают уровня $T > P95$, но это требует проверки.

Таблица 1. Статистика числа летних сезонов периода 1936-2021 гг. со значениями $ND95$ в заданных градациях и числа сезонов с волнами тепла ($NHW > 0$) по тем же градациям $ND95$

Table 1. Statistics of the number of summer seasons for the period 1936-2021 with $ND95$ values in given categories and the number of seasons with heat waves ($NHW > 0$) according to the same $ND95$ categories

Градация $\Gamma(ND95)$	Число случаев (1936-2021 гг.)	
	$ND95 \in \Gamma(ND95)$	$NHW > 0$
$ND95 = 0$	12	0
$0 < ND95 < 5$	41	10
$5 < ND95 < 10$	24	17
$ND95 > 10$	9	8

Сезонов с волнами холода было значительно меньше, чем с волнами тепла: всего 25 (29%), а лет, когда отмечены экстремально низкие температуры ниже $P05$ – 80%. В отличие от волн тепла, более одной волны холода за одно лето случалось более часто: в 5-летних сезонах было по две волны. Наблюдалась единственная волна продолжительностью 10 дней – в 1970 г., остальные волны были не длиннее 7 дней.

Сезонная продолжительность волн холода $NDCW$ и сезонное число дней с экстремально низкими температурами $ND05$ ожидаемо убывают с середины 1970-х годов, как и само число сезонов с волнами (их в период 1936-1975 гг. было 16, или 40% сезонов этого периода, а после 1975 г. – всего 9, т. е., вдвое реже – 20%). Среднее 11-летнее $NDCW$ убывает с 5 дней в 1976 г. (середина интервала осреднения) до 0 в 2016 г. (с 2010 г. волн холода не наблюдалось). Хотя убывание очевидно не линейное (в основном произошло до 1990 г.), приведем оценку линейного тренда: -0.45 дня за десятилетие, коэффициент детерминации 0.09, тренд значим на уровне 5% (двусторонний Т-критерий). Для $ND05$ тренд -0.6, но тренд незначим.

На рис. 2 представлена структура температурных аномалий в волнах тепла и холода и сопровождающие их условия циркуляции в средней тропосфере (H500): композиты, т.е. средние величины за дни с волнами тепла с 1951 по 2020 год (средние аномалии температуры рассчитаны с 1951, а не с 1936 г., чтобы использовать единый с H500 период).

Максимальные аномалии в волнах тепла, достигающие 5.7°C , наблюдаются в районе 57°с.ш. , 78°в.д. , на северной границе выбранного региона (в Васюганских болотах – район Нижневартовска). В зернопроизводящих районах, южнее, восточнее и западнее – от 3 до 5°C . Тёплый воздух выносится вдоль западной границы гребня из ложбины в регионе Северного Причерноморья – Нижнего Поволжья. На карте среднего геопотенциала H500 по всем волнам основные центры действия Северного полушария: Исландская депрессия, Азорский антициклон и Алеутский минимум – ослаблены, что приводит к почти зональным тропосферным изогипсам в океанских секторах. Можно было бы на этом основании заключить, что тропосферные воздушные потоки почти на всём полушарии в период волн тепла на юге Западной Сибири зональны, за исключением меридионального возмущения в виде гребня над Западной Сибирью; однако рис. 3 показывает, что это не так.

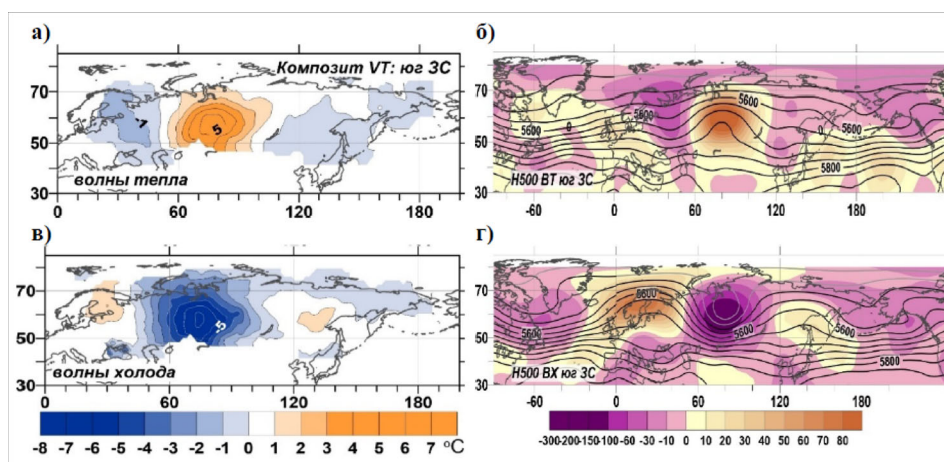


Рисунок 2. Композиты аномалии среднесуточной температуры приземного воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на станциях РФ за летние дни с волнами тепла (а) и холода (в) на юге Западной Сибири в период 1951-2021 гг. Композиты высоты изобарической поверхности 500 гПа (изолинии, м) и ее аномалии (цветная заливка, м) по данным реанализа NCEP/NCAR за летние дни с волнами тепла (б) и холода (г)

Figure 2. Composites of anomalies of average daily surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at stations of the Russian Federation for summer days with heat waves (a) and cold waves (b) in the south of Western Siberia in the period 1951-2021. Composites of the 500 hPa isobaric surface height (contours, m) and its anomalies (color shading, m) according to NCEP/NCAR reanalysis data for summer days with heat waves (б) and cold waves (г)

Волны холода в среднем более интенсивны, чем волны тепла: средняя по всем волнам за период 1951-2021 гг. аномалия достигает -7.1°C . Однако они наблюдаются значительно реже, и они менее продолжительны: всего с 1936 г. их было 29 (волн тепла – 40), суммарная продолжительность за весь период 180 дней (волн тепла – 264); средняя продолжительность волны холода – 6.2 дня, волны тепла – 6.6 дня, в среднем за сезон 2.1 и 3.1 соответственно.

Циркуляционные условия развития волн холода весьма интересны: на карте геопотенциала (рис. 2г) видно, что область отрицательных аномалий

расположена в глубокой ложбине, а несколько севернее центра этой области наблюдается замкнутая изогипса 540 дам: таким образом, волна холода сопровождается высоким и малоподвижным (поскольку он сохраняется при осреднении) циклоном. Такого рода квазистационарные циркуляции (циклонические) по сравнению с антициклоническими изучены недостаточно: данный пример показывает, что им следует уделить значительное внимание. К западу от ложбины расположен гребень с максимальной положительной аномалией геопотенциала над Скандинавией на севере и на юге над Средиземноморьем. Такая структура аномалий определяет так называемую Скандинавскую моду (СКАНД) в её положительной фазе (Barnston, Livezey, 1987; см. также https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/scand_map.shtml). Расположение областей тепла и холода в положительной фазе СКАНД (см. там же) в целом соответствует полученному для волн холода на юге Западной Сибири, но в последнем случае положительная аномалия над Скандинавией значительно слабее, а в Сибири – сильнее и расположена немного западнее – примерно на 10 градусов.

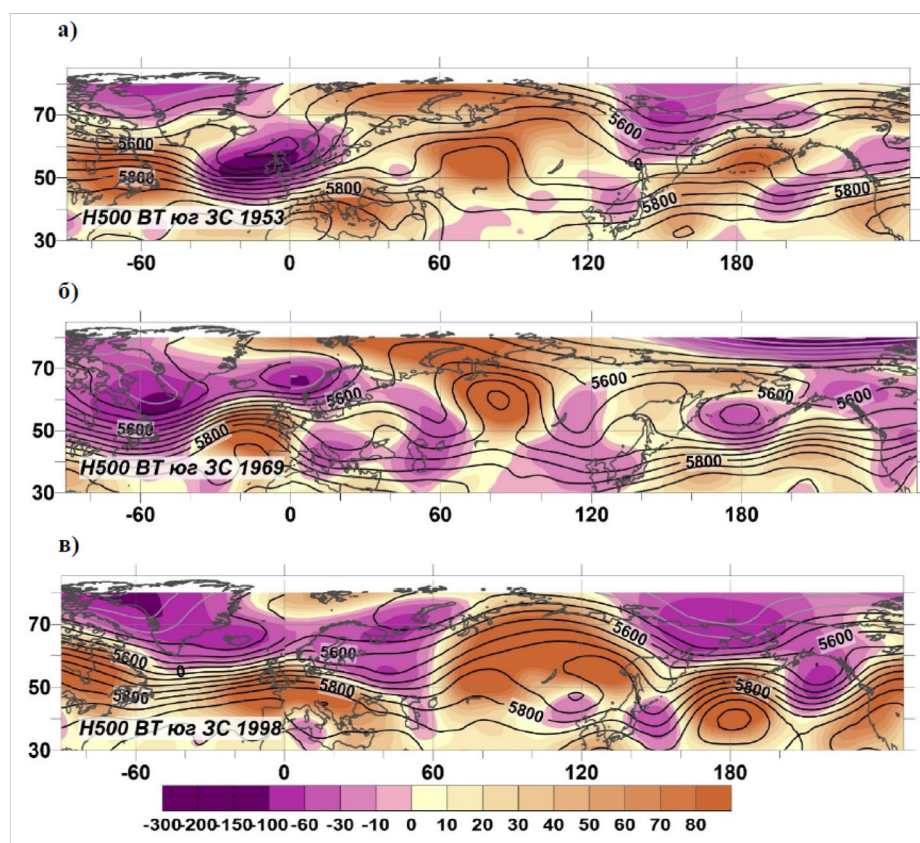


Рисунок 3. Летние композиты поля геопотенциала H500 (изолинии) и аномалии (цветная заливка, м) для трех наиболее продолжительных волн тепла: 15-24.07.1953 (а), 31.06-13.07.1969 (б) и 03-15.08.1998 гг. (в).

Figure 3. Summer composites of the H500 geopotential height (contours) and anomalies (color shading, m) for the three longest heat waves: 15-24.07.1953 (a), 31.06-13.07.1969 (b) and 03-15.08.1998 (v)

В действительности, в атлантическом и европейском секторе в период развития этих волн наблюдаются значительные положительные аномалии геопотенциала на юге и отрицательные на севере, однако локализации этих аномалий различны, и могут быть интерпретированы как летние положительные фазы Североатлантического колебания (САК) (положительные аномалии на западе Атлантики, отрицательные в Арктике) или/и Восточно-Атлантической моды (ВА): положительные аномалии на востоке, отрицательные – в умеренных широтах. Значения соответствующих индексов САК и ВА для месяцев, когда наблюдались эти волны (0.43 и 0.74 для июля 1953 г.; 0.60 и -0.10 для июля 1969 г.; -0.15 и 1.31 для августа 1998 г.) подтверждают это наблюдение. Заметим, что при положительном САК в выбранном нами секторе 60-90° в.д. в 1969 г. развивается блокирование омега-типа (Обухов и др., 1984), а при положительном ВА в 1998 г. – пологий гребень; в 1953 г., когда положительно оба индекса, наблюдалась промежуточная конфигурация.

Таким образом, волны тепла на юге Западной Сибири сопровождаются крупными гребнями и ложбинами, т. е. развитой меридиональной циркуляцией в атлантико-европейском секторе; однако локализации их смещены относительно друг друга для разных волн, что и дает при осреднении картину слабой меридиональной циркуляции. По-видимому, сказанное можно отнести и к тихоокеанскому сектору, хотя там меридиональные циркуляции для отдельных волн выражены слабее (но довольно мощный гребень и блокирование типа Рекса в дальневосточном регионе (Pelly, Hoskins, 2003; Обухов и др., 1984) в 1998 г., вероятно, связаны между собой, и указанное блокирование поддерживает существование самого по себе довольно пологого гребня в секторе 60-90° в.д.).

Рассмотрим подробнее статистику основных мод циркуляции атлантико-европейского сектора в связи с волнами тепла и холода, а именно, повторяемость фаз в месяцы, когда осуществлялась волна. Конечно, было бы правильно брать суточные значения индексов в период развития волн, но пока нам доступны лишь месячные значения. Поэтому было бы желательно рассматривать только достаточно продолжительные волны, чтобы они захватывали более значительную часть месяца: скажем, 10 дней. К сожалению, таких волн немного на юге Сибири для более или менее надежной статистики, и мы ограничиваемся волнами от 7 дней и выше для волн тепла и рассматриваем все волны холода. Период выборки начинается с 1950 г.: только такие данные индексов доступны, поскольку для их расчета использованы данные реанализа H500.

Для волн тепла (выборка 12 случаев) получены следующие результаты (табл. 2). Прослеживается связь только с индексом СКАНД: 75% отобранных волн проходили при отрицательной фазе СКАНД. Вероятность случайно получить 3 или меньше СКАНД+ из 12 испытаний с равновероятным исходом (т. е., при отсутствии связи) <0.053 – больше 5%, т. е., на этом уровне значимости гипотезу об отсутствии связи отвергнуть нельзя, но её следует серьёзно иметь в виду, учитывая, кроме того, что структура отрицательной фазы СКАНД достаточно отчётливо прослеживается в композите H500 для волн тепла на рис. 2.

Для волн холода (18 случаев: напомним, что это не отобранные более длинные волны, а все с 1950 г.) имеются две моды, одна из фаз которых значительно повышает вероятность развития волны холода на юге Западной Сибири. Это положительная фаза СКАНД ($p < 0.01$) и отрицательная ВА ($p < 0.001$). Таким образом, волны холода в этом регионе значительно сильнее связаны с циркуляционными режимами евроатлантического сектора, чем волны тепла.

Таблица 2. Число летних месяцев за период 1950–2021 гг., когда наблюдается волна тепла (холода) на юге Западной Сибири при положительной фазе циркуляционной моды
N – объём выборки. Для значимых связей указан уровень значимости

Table 2. The number of summer months for the period 1950–2021 when a heat (cold) wave is observed in the south of Western Siberia during a positive phase of the circulation mode
N – sample size. For significant connections, the significance level is indicated

	САК +	ВА+	ВАЗР+	СКАНД+	N
Волны тепла	7	7	5	3	12
Волны холода	8	3	11 ($p < 0.01$)	16 ($p < 0.001$)	18

Примечание: САК+, ВА+ и т. д. обозначают положительную фазу соответствующей моды

Северо-Кавказский и Центрально-Чернозёмный регионы

Изменения экстремальности жарких температурных режимов в целом для юга ЕЧР подробно рассмотрены в недавней работе авторов (Бардин и др., 2023). Поэтому основная задача этого раздела – выявить различия в статистике и изменениях показателей экстремальности и в структуре волн тепла между двумя главными зернопроизводящими районами ЕЧР и между ними и югом Западной Сибири.

В первую очередь следует отметить намного большее количество волн тепла, наблюдавшихся на юге ЕЧР, и их суммарной продолжительности, по сравнению с ЮЗС (табл. 3, период с 1936 г. выбран для сравнения с ЮЗС). В ЦЧ регионе в первом периоде волн тепла и дней в волнах было вдвое больше, чем в ЮЗС, а во втором волн на 80% больше, а дней вдвое. В СК в первом периоде оба показателя на 70% больше, а во втором волн больше вдвое, а дней почти втрое.

Таблица 3. Характеристики волн тепла и холода в регионах юга ЕЧР и ЮЗС суммарно для периодов 1936–1975 и 1976–2021
1 – NHW, *2* – NDHW, $\delta = N(1976-2021)/N(1936-1975)$

Table 3. Characteristics of heat and cold waves in the regions of the south of the ER and SWN in total for the periods 1936–1975 and 1976–2021
1 – NHW, *2* – NDHW, $\delta = N(1976-2021)/N(1936-1975)$

Регион	Волны тепла						Волны холода					
	1936–1975		1976–2021		δ		1936–1975		1976–2021		δ	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
СК	25	172	50	452	2.0	2.6	15	93	14	91	0.9	1.0
ЦЧ	31	227	45	346	1.5	1.5	18	106	13	84	0.7	0.8
ЮЗС	15	102	25	162	1.7	1.6	18	118	12	62	0.7	0.5

Помимо повторяемости важна интенсивность рассматриваемых волн. В этом контексте для нас наиболее интересны волны тепла, в особенности, в экстремальные сезоны, когда их продолжительность была наибольшей. Определенное представление об этом даёт табл. 4, где для каждого региона для трёх сезонов с максимальным *NDHW* приведена статистика по 7 избранным станциям (по возможности равномерно отобраным по территории) среднесуточных температур (*Тсут*) и максимальных суточных температур (*Тмакс*): медиана *Мед*(.), *Макс*(.) и *Мин*(.). В общем, для всех регионов и лет цифры похожи: для всех регионов и отобранных сезонов медианные значения средних суточных температур изменяются от 27 (ЮЗС) до 32°C (СК и ЦЧ); ожидаемо различия оказались выше для максимальных суточных температур, которые сильно зависят от характеристик подстилающей поверхности: от 34 (ЮЗС и ЦЧ) до 41°C (СК и ЦЧ). Максимальная температура наблюдалась на станции 34866 Яшкуль в 2010 г. Тем не менее, имеются систематические различия: практически все показатели ниже в ЮЗС. Например, в 1998 г. максимальные температуры в волнах в ЮЗС ниже на 2-4 градуса, чем в ЦЧ, и только максимальные значения *Тмакс* одинаковы: 40°C. Сравнение показателей в СК и ЦЧ даёт вполне естественный результат: температуры в СК регионе выше, за исключением максимальных суточных температур и медиан среднесуточных в 2010 году.

Таблица 4. Характеристики максимальных температур в волнах тепла и холода на станциях в регионах юга ЕЧР и Западной Сибири за три сезона с максимальной суммарной продолжительностью волн
Пояснения см. в тексте

Table 4. Characteristics of maximum temperatures in heat and cold waves at stations in the regions of the south of the ER and WS for three seasons with the maximum total duration of the waves
See text for details

Регион	Год	Тсут			Тмакс		
		Мед	Мин	Макс	Мед	Мин	Макс
СК	1972	30	29	30	37	36	39
	2006	31	30	33	41	38	41
	2010	32	32	35	40	39	44
ЦЧ	1972	28	23	30	34	33	38
	1998	30	27	33	38	35	40
	2010	32	29	34	41	37	43
ЮЗС	1953	28	25	31	35	34	39
	1969	27	25	29	35	28	37
	1998	27	25	30	34	32	40

Таким образом, число, продолжительность и интенсивность волн тепла на юге Западной Сибири значительно меньше, чем на юге ЕЧР. Это обстоятельство объясняется большей удалённостью (и естественным препятствием в виде Уральских гор) Западной Сибири от Атлантики, с которой связаны основные циркуляционные режимы, влияющие на экстремальность темпера-

турного режима в Северной Евразии (Бардин, Платова, 2019; Бардин и др., 2023; Коваленко и др., 2017; Черенкова и др., 2020).

Отметим, что в первом периоде в Центрально-Черноземном регионе было больше волн тепла, чем в Северо-Кавказском (на 29%) и дней в волнах (на 32%), а во втором – наоборот, в СК регионе волн было больше на 11%, а дней в волнах – на 31%. Это выражается в значительно более быстром росте показателей экстремальности в Северо-Кавказском регионе.

В связи с этим перейдём к рассмотрению изменений показателей экстремально тёплых режимов в течение XX – первых десятилетий XXI вв. Общий характер изменений представлен на рис. 4 и 5. До 1920 г. в СК регионе наблюдались лишь две короткие волны тепла (рис. 4а), и в среднем сезонная продолжительность волн близка к 0. Далее до начала 1980-х годов наблюдалось в среднем около 6 волн за десятилетие, причём в каждое десятилетие наблюдался один сезон с *NDHW* более 15 дней и еще один с *NDHW* около 10 дней: в среднем за десятилетие сезонная продолжительность волн тепла составляет около 5 дней с провалом в 1940-е годы (см. 11-летнюю сглаженную кривую). Такая 10-летняя квазирегулярность хорошо видна на кривой с 5-летним сглаживанием. С 1980 г. до середины 1990-х годов наблюдается провал, а затем начинается очень быстрый рост: за период современного потепления с 1976 г. средняя скорость роста (линейный тренд) – 5.5 дней за десятилетие (табл. 5); при росте с этой скоростью к 2021 г. сезонная продолжительность волн тепла достигает 20 дней. Ещё больше эта скорость получается, если оценивать её с 1990 г.: 7.1 дня за десятилетие, и 25 дней за сезон к 2021 году. Для ряда лет этого периода *NDHW* превосходит указанную цифру 25 дней: 1998 г. – 30 дней в волнах тепла, 2010 г. – 42 дня, 2016 г. – 27 дней, 2019 г. – 32 дня, 2021 г. – 32 дня. При этом сохраняется отмеченная 10-летняя квазипериодичность на фоне общего роста. Для числа дней с температурой выше 95-го перцентиля наблюдается очень близкая картина изменений. Отметим также, что после 2005 г. не было ни одного года с *NDHW* или *ND95*=0.

Таблица 5. Оценки скорости изменения характеристик волн тепла и холода в регионах юга ЕЧР и Западной Сибири для периода 1976-2021 гг.

(*b* – линейный тренд, дней за десятилетие; R^2 – коэффициент детерминации, или вклад тренда в общую дисперсию)

Table 5. Estimates of the rate of change in the indices of heat and cold waves in the southern regions of the ER and WS for the period 1976-2021

(*b* – linear trend, days per decade; R^2 – coefficient of determination, or the contribution of the trend to the total variance)

Регион	Волны тепла				Волны холода			
	NDHW		ND95		NDCW		ND05	
	<i>b</i>	R^2	<i>b</i>	R^2	<i>b</i>	R^2	<i>b</i>	R^2
СК	5.5	0.45	4.9	0.50	-1.3	0.15	-1.3	0.26
ЦЧ	3.0	0.17	2.8	0.20	-0.9	0.13	-0.8	0.17
ЮЗС	<i>0.4</i>	0.02	<i>0.3</i>	0.01	-0.6	0.09	-0.6	0.07

Примечание: Жирный шрифт – оценки, значимые на 1%-м уровне, курсив – незначимые на уровне 5%

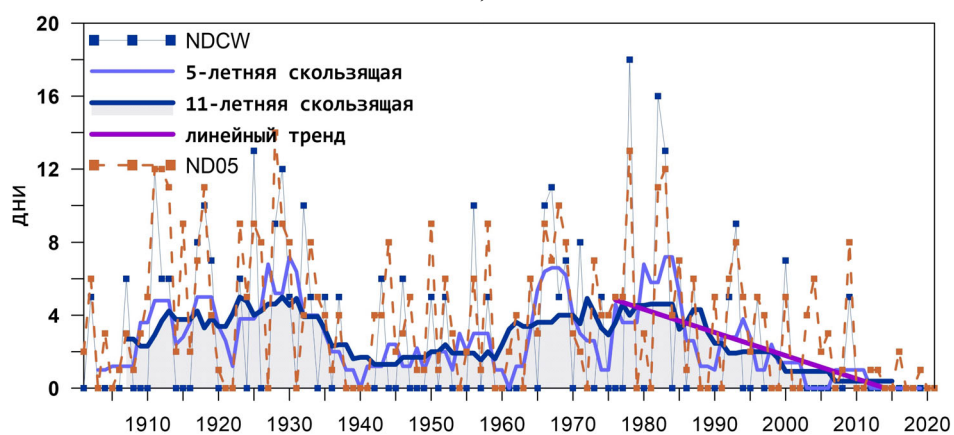
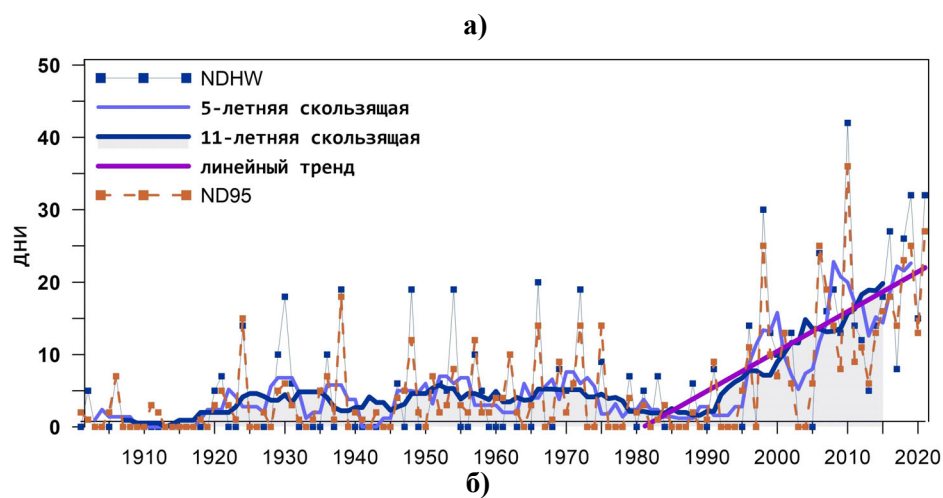
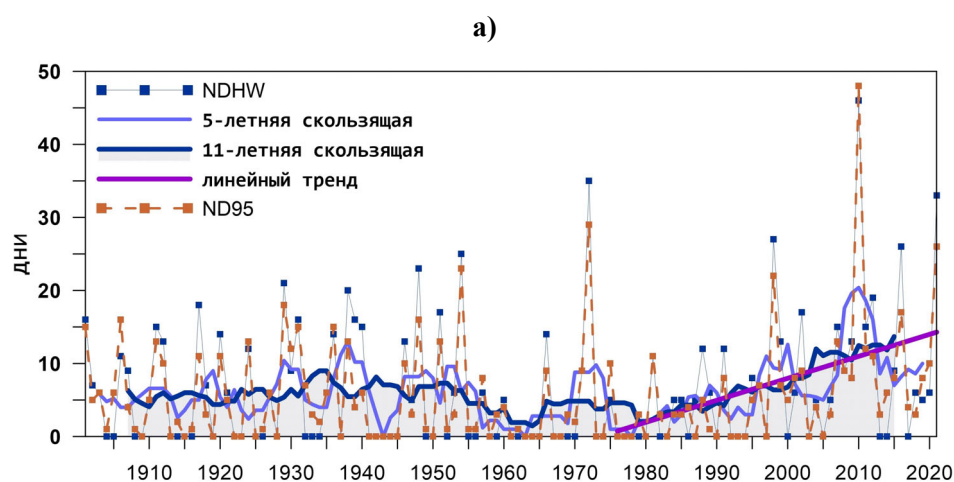


Рисунок 4. То же, что и рис.1, для Северо-Кавказского региона

Figure 4. Same as Fig. 1, for the North Caucasus region



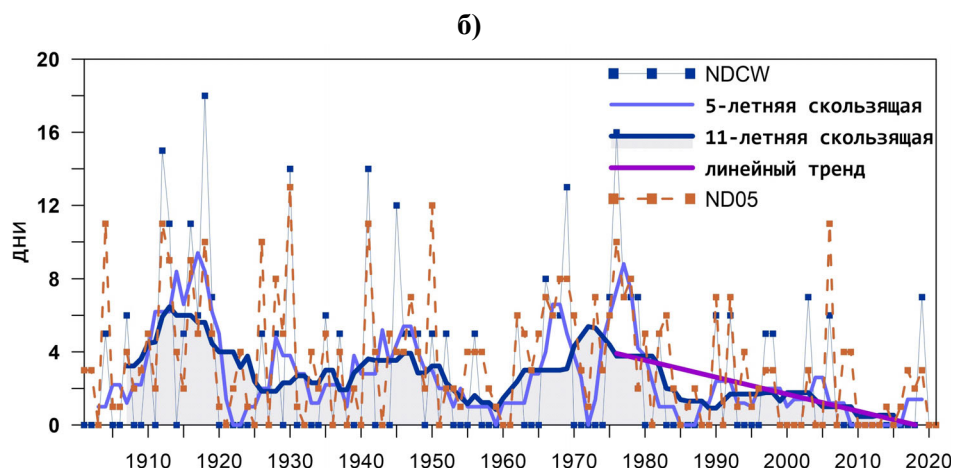


Рисунок 5. То же, что и рис.1, для Центрально-Черноземного региона

Figure 5. Same as Fig. 1, for the Central Black Earth region

В Центрально-Черноземном регионе всю первую половину XX века среднее сезонное число дней в волнах тепла (11-летняя сглаженная кривая на рис. 5а) сохранялось в пределах 5-7 дней, затем последовал провал в 1960 г., а в 1972 г. случился один из самых известных экстремальных летних сезонов (Кац, 1973) с 35 днями в волнах тепла. С начала 1980-х годов отмечается начало быстрого роста, однако, значительно меньшего, чем в СК регионе: 3 дня за десятилетие. При этом к 2021 г. достигнут уровень около 15 дней за сезон. Отметим, что сезоны с *NDHW*, превышающим 15 дней, неоднократно наблюдались и до начала потепления (10 сезонов за 70 лет), но средний уровень периода 1901-1975 гг. (5.7 дня) был превзойден уже в начале 1990-х годов. Самые экстремальные сезоны периода потепления: 1998 г. – 27 дней в волнах тепла; 2010 г. – 46 дней; 2012 г. – 19 дней; 2016 г. – 26 дней; 2021 г. – 33 дня. Рост связан, с одной стороны, с этими сверхэкстремальными сезонами в конце периода, а с другой – значительным уменьшением числа сезонов без волн тепла: если в период 1901-1975 гг. таких случаев было 5.2 за десятилетие, то после 2000 г. – всего 2.5. Заметим, что и здесь в изменениях наличествует квази-10-летняя периодичность.

Изменения индексов волн холода носят значительно более сложный характер. В Центрально-Черноземном регионе (рис. 5б) наблюдалось четыре крупные волны (период около 30 лет); первые три имели амплитуды 3-4 дня, последняя происходила на фоне потепления и имеет значительно меньшую амплитуду. Максимумы наблюдались в 1910-х, 1940-х, 1970-х и 2000-х годах, минимумы в 1920-х, 1950-х и 1980-х. Такое поведение соответствует региональной средней летней температуре (рис. 6), однако с определенными сдвигами: наиболее заметные – минимуму *NDHW* около 1925 г. соответствует максимум среднесезонной температуры около 1935 г., а максимуму *NDHW* около 1970 г. – минимум температуры около 1980 г.

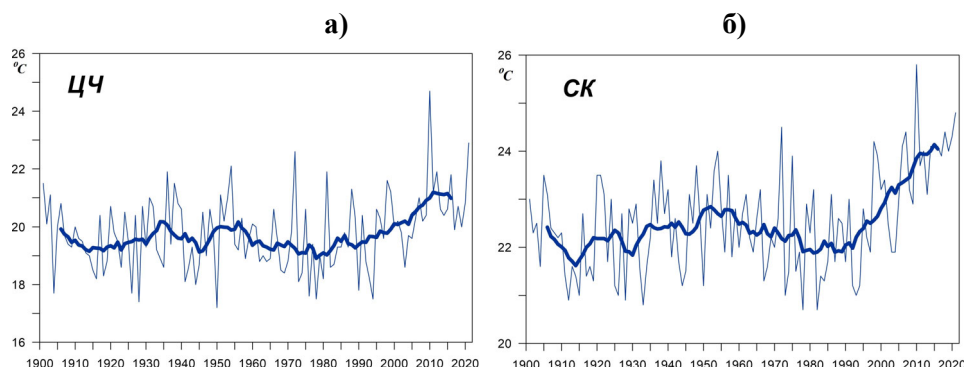


Рисунок 6. Изменения средней региональной температуры летнего сезона (°C) для Центрально-Черноземного (а) Северо-Кавказского (б) регионов (в границах, указанных в разделе Данные и методы)
Выделенная кривая – 11-летняя скользящая средняя

Figure 6. Changes in the average regional temperature of the summer season (°C) for the Central Black Earth (a) and North Caucasus (б) regions (within the boundaries specified in the Data and Methods section)
Highlighted curve – the 11-year moving average

В случае Северо-Кавказского региона имеются значительные расхождения в первой половине XX века: средняя региональная температура (рис. 6(б)) постоянно растет в период 1910-1950 гг., при этом *NDHW* в 1910-30-е гг. и в 1940-50-е также растет, хотя, следуя ходу средней температуры, должно было убывать. Во второй половине XX и в первые два десятилетия текущего века поведение средней температуры и индекса сезонной продолжительности волн находится в полном согласии: с минимумом температуры и максимумом *NDHW* в 1980-е и дальнейшим быстрым ростом температуры и убыванием *NDHW*. Отмеченные расхождения в поведении средней температуры и сезонной продолжительности волн могут быть объяснены наличием общего внешнего фактора, влияющего на обе характеристики, которые притом обладают разным временем реакции на его изменения. На эту роль, учитывая временные масштабы колебаний, лучше всего подходит региональная циркуляция и её изменения в связи с изменениями в системе океан-атмосфера Северной Атлантики; однако, пока мы не готовы предъявить соответствующий анализ (доступные ряды индексов основных циркуляционных мод доступны лишь со второй половины XX века).

Структуры поля аномалии температуры для каждого из регионов, по существу, зеркально симметричны с противоположным знаком (рис. 7). Центр средней области аномалии смещен, естественно, по широте в тот регион, для которого получена статистика; аномалии в волнах тепла, так и холода, несколько интенсивнее для ЦЧ региона.

Наконец, рассмотрим сопутствующие волнам тепла и холода условия в средней тропосфере (рис. 8). Для региона юга России (немного более широкого, чем СК в этой статье: до 50°с.ш.) этот вопрос подробно рассмотрен в (Бардин и др., 2023). Тропосферный гребень, ограниченный на карте абсо-

лутной топографии Н500 изогипсой 5760 гПм, препятствует переносу холодного воздуха Атлантики на юг ЕЧР. Для ЦЧ региона гребень проникает значительно севернее и блокирует западный перенос в средних широтах. В упомянутой работе для сравнения приведен композит Н500 для волн в широтной зоне 50-60°с.ш. (напомним, что здесь ЦЧ на севере – 54°с.ш., т. е., захватывает только южную половину этой зоны). Этот композит показывает наличие замкнутого антициклона с центром около 55°с.ш., по южной периферии которого возможно проникновение атлантического воздуха в южный (СК) регион. Отметим, что в цитированной статье композиты строились только для достаточно длительных волн: от 8 дней. Поэтому вполне возможно аналогичное развитие тропосферного антициклона для достаточно длинных волн в ЦЧ регионе: определенные указания на это имеются на рис. 8, где видно, что ложбины на западе и востоке от узкого гребня в центре, ограниченного 5800 гПа, глубоко проникают на юг и способствуют затоку холодного воздуха.

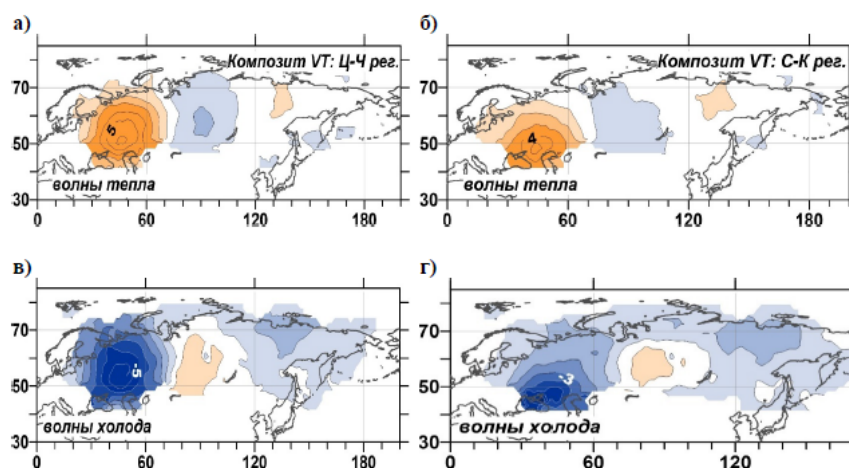


Рисунок 7. То же, что на рис. 2а, в, для Центрально-Черноземного региона (а, в) и Северо-Кавказского региона (б, г)

Figure 7. Same as in fig. 2а, в, for the Central Black Earth region (а, в) and the North Caucasus region (б, г)

Для волн холода, как для СК, так и для ЦЧ региона характерна область пониженного давления над ЕЧР, соответствующая моде ВАЗР⁺. Для волн ЦЧ региона, кроме того, следует отметить блокинг на востоке Атлантики, а также упоминавшуюся для юга Западной Сибири структуру отсеченного циклона на севере ЕЧР.

Рассмотрим вклад основных циркуляционных мод Северного полушария в статистику волн тепла и холода в регионах юга ЕЧР. Для волн тепла конфигурация с положительными аномалиями давления над ЕЧР и Северной Атлантикой указывают на моду Восточная Атлантика – Запад России (ВАЗР) в отрицательной фазе. Был выполнен прямой подсчёт числа летних месяцев за период 1950-2021 гг., когда волна, для которой по крайней мере 8 дней проходили в этом месяце, находилась в положительной (отрицательной) фазе одной из 4 мод: САК, Восточно-Атлантическая (ВА), ВАЗР и Скандинавская

(СКАНД). Напомним, что массив индексов¹⁾ ведущих циркуляционных мод Северного полушария содержит месячные значения индексов.

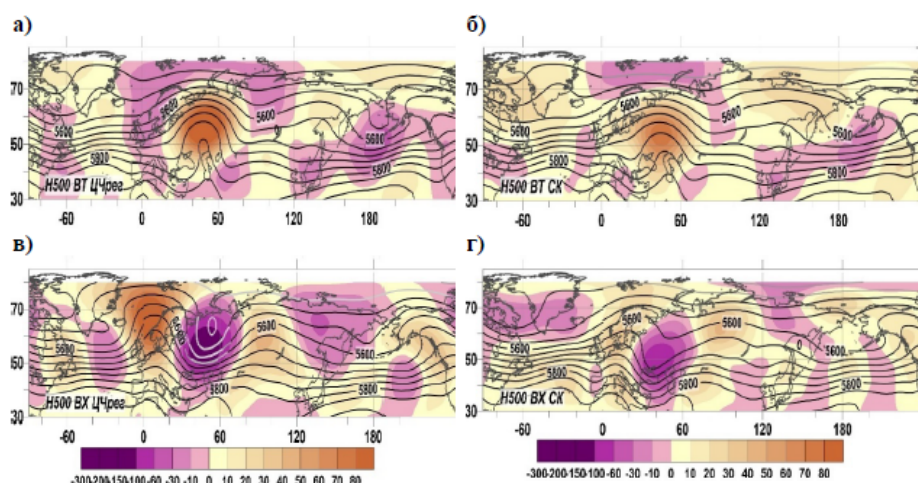


Рисунок 8. То же, что на рис. 2б, г, для Центрально-Черноземного региона (а, в) и Северо-Кавказского региона (б, г)

Figure 8. Same as in fig. 2b, d, for the Central Black Earth region (а, в) and the North Caucasus region (б, г)

Подсчет показал (табл. 6), что для СК отрицательная фаза ВАЗР наблюдалась в 25 из 30 (80%) таких случаев, а для ЦЧ – в 12 из 17 (71%). Вероятности получить такие значения или меньшие при отсутствии связи (т. е., если фазы равновероятны) соответственно около 1.6×10^{-4} и 4.7×10^{-2} , т. е. гипотеза о наличии связи не может быть отвергнута в первом случае – на уровне 0.1%, во втором – значима на уровне 5%. Кроме того, обнаружилось, что для СК есть ещё две моды, каждая из которых потенциально влияет на осуществление волн тепла в регионе: это САК (в отрицательной фазе 20 из 30 волн) и ВА (тоже 20 из 30, но в положительной фазе): вероятности таких значений при отсутствии связи < 0.05 . Заметим, «неправильные» фазы всех трёх мод (т. е., $САК^+$, $ВА^-$, $ВАЗР^+$) наблюдались единственный раз в июне 1966 г. Для региона ЦЧ тоже есть ещё один «фактор» – САК, отрицательная фаза которого наблюдается при волнах тепла те же 12 раз из 17, что и ВАЗР; но обе неправильные фазы ($САК^+$, $ВАЗР^+$) встречаются лишь однажды: в июне 1954 года.

Для волн холода ситуация сложнее и результаты менее надёжны, поскольку продолжительных волн холода на юге ЕЧР наблюдалось мало: 12 в СК регионе, и всего 8 – в ЦЧ. Поэтому приведены также результаты для всех волн холода, которых всё же больше 20 в каждом из регионов.

В СК регионе длинные (от 8 дней) волны холода наблюдаются в 75% случаев при $САК^+$, $ВА^-$ и $ВАЗР^+$ (последнее ожидаемо в соответствии с компози- том H500 на рис. 8). Однако уровень значимости невысок: вероятность 3 или

¹⁾<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>

меньше «успехов» в серии из 12 испытаний около 7%. Но при рассмотрении всех волн связь с $BAZP^+$ неожиданно исчезает, зато наблюдается высокая (0.5%) значимость связи с отрицательной фазой ВА, проявления которой не видны на композитной карте. Возможное объяснение состоит в том, что более длинные волны наблюдаются при $BAZP^+$, а при BA^- более короткие, так что при осреднении на композитной карте проявляется структура $BAZP^+$, но не BA^- .

Таблица 6. Число летних месяцев за период 1950-2021 гг., когда наблюдается волна тепла (холода) длительностью от 8 дней на юге ЕЧР при положительной фазе циркуляционной моды
N – объём выборки. Для значимых связей указан уровень значимости

Table 6. The number of summer months for the period 1950-2021 when a heat (cold) wave lasting from 8 days is observed in the south of the European Region with a positive phase of the circulation mode
N – sample size. For significant connections, the significance level is indicated

	САК +	ВА+	BAZP+	СКАНД+	N
Северо-Кавказский регион					
Волны тепла	10 (p<0.05)	20 (p<0.05)	5 (p<0.001)	12	30
Волны холода (>7дней)	9	3	9	6	12
Волны холода (все)	13	5 (p<0.005)	14	14	24
Центрально-Чернозёмный регион					
Волны тепла	5 (p<0.05)	10	5 (p<0.05)	8	17
Волны холода (>7дней)	4	4	5	6	8
Волны холода (все)	10	10	16 (p<0.05)	13	22

В Центрально-Чернозёмном регионе на короткой выборке нет значимых результатов, а для полной выборки картина более понятная, в этом случае преобладает $BAZP^+$ (73% выборки) со значимостью 5%. Сходная с $BAZP^+$ для СК региона ситуация складывается с модой СКАНД⁺: положительная аномалия над Скандинавией явно видна на композитной карте (хотя, видимо, западнее своего стандартного положения) и проявляется для 75% длинных волн, а при включении коротких становится меньше 60%.

Обсуждение

Глобальное потепление в первую очередь выражается в общем смещении функции распределения температуры (глобальной, региональной или локальной) в сторону более высоких температур; при отсутствии изменений дисперсии межгодовых колебаний (а надёжных свидетельств существования последних, по-видимому, в настоящее время не имеется) это приводит к увеличению повторяемости «тёплых» экстремумов и уменьшению «холодных». Кроме того, следует иметь в виду существование региональных режимов атмосферной циркуляции, в условиях которых повышается вероятность осуществления экстремальных температур. Так, в (Бардин, 2007) показано, что правые хвосты функции распределения аномалии суточной температуры на станциях в обширной «области влияния» антициклонической квазистационарной циркуляции (блокирования), наблюдаемой на востоке ЕЧР, относятся

преимущественно к датам с наличием такого блокирования, и даже могут быть бимодальны с дополнительной модой, относящейся к этим эпизодам. Отсюда следует, что изменения повторяемости экстремумов могут быть также связаны с изменениями региональной циркуляции, которые в свою очередь связаны с изменениями крупномасштабной циркуляции (ОДЗ, 2022). Некоторые непосредственные результаты оценки связи температурных экстремумов с модами крупномасштабной атмосферной циркуляции (Barnston, Livezey, 1987; Molteni et al., 1990; Vautard, 1990; Cheng, Wallace, 1993) рассмотрены в работах (Коваленко и др., 2017; Бардин, Платова, 2019; Бардин и др., 2023).

Как указывалось во Введении, экстремальные режимы могут оказывать значительное (порой катастрофическое) воздействие на сельскохозяйственное производство. С этой точки зрения рост экстремальности температурного режима в Северо-Кавказском регионе вызывает наиболее серьёзные опасения в плане увеличения риска засухи. При наблюдаемых темпах роста сезонной продолжительности волн тепла к середине столетия она может достигнуть 35-45 дней *в среднем*, т. е., величин, наблюдавшихся до сих пор лишь в единичные наиболее экстремальные годы. Несколько менее критична ситуация в Центрально-Черноземном регионе: здесь к середине столетия можно ожидать роста до 25 дней, т. е., примерно существующий на сегодняшний день уровень Северо-Кавказского региона. Ситуация на юге ЕЧР в целом осложняется тем, что эпизоды блокирования (или квазистационарной антициклонической циркуляции (Бардин, 2007)) здесь развиваются летом при отрицательной фазе одной из ведущих мод атмосферной циркуляции: моды Восточная Атлантика – Западная Россия – ВАР (Barnston, Livezey, 1987; Бардин и др., 2023; ОДЗ, 2022). В свою очередь, отрицательная фаза ВАР связана с повышенными температурами поверхности Северной Атлантики (Черенкова и др., 2020), так что при потеплении частота её появления ожидаемо возрастает, что приводит к дополнительному росту индексов положительных экстремумов (Бардин и др., 2023).

Положение в районах юга Западной Сибири можно считать достаточно благоприятным: здесь при сохранении темпов изменения не ожидается, что *существующий* уровень Центрально-Черноземного региона будет достигнут даже к концу столетия. Кроме того, поскольку здесь волны тепла фактически не связаны с отрицательной фазой ВАР: на композитной карте H500 для всех волн тепла ЮЗС (рис. 2) над ЕЧР расположена область отрицательной аномалии, что соответствует положительной фазе ВАР (если какая-то связь вообще имеется). Кроме того, даже в 2010 г., когда соответствующие этой циркуляционной моде квазистационарные области антициклонической циркуляции наблюдались над ЕЧР практически 2/3 сезона (15 дней в июне, почти весь июль и 15 дней в августе), на юге Западной Сибири не наблюдалось *ни одной* волны тепла (хотя слабо положительные аномалии температуры отмечены в западной части, до 70° в.д.).

Таким образом, получены оценки изменения статистики показателей экстремальности температурного режима в основных зернопроизводящих

регионах РФ, выявлены их связи с ведущими модами атмосферной циркуляции. Однако, остается ряд вопросов.

Число и продолжительность волн холода убывают при потеплении во всех регионах. Для юга Западной Сибири и Центрально-Черноземного региона, где средние летние температуры на 4-5 градусов ниже, чем в Северо-Кавказском регионе, по-видимому, это может давать (в этих регионах) положительный эффект для сельского хозяйства за счёт температурных условий вегетации. Однако поскольку волны холода в умеренных широтах летом преимущественно связаны с циклонами, это может сказаться в ухудшении условий увлажнения. Непосредственный анализ изменения частоты циклонов на юге ЕЧР не указывает на устойчивую тенденцию к ее снижению: имеются долгопериодные (20-30 лет) колебания, в частности, снижение наблюдалось с 1990-х по 2000-е годы, затем отмечается рост до начала 2010-х годов, затем опять частота циклонов убывает (Бардин и др., 2021). Регрессионный анализ изменения циклонической активности юга ЕЧР в зависимости от индексов циркуляции САК и ВАМ, показал: значимая связь в обоих случаях – отрицательная. Летний индекс ВАМ устойчиво растет с начала 1970-х годов, для САК наблюдалось убывание после 1990 г., но после 2010 г. он растет; модельные оценки тренда индекса САК при потеплении довольно противоречивы; однако, есть некоторые основания предполагать, что при высоких значениях арктического усиления может наблюдаться смещение штормтреков к югу. Возможно, это улучшит увлажнение в ЦЧ регионе (за счёт северной ветви атлантического штормтрека) и ухудшит в СК регионе (за счет более южных траекторий средиземноморских циклонов). Так что суммарный эффект для сельского хозяйства от изменений условий увлажнения в связи с изменениями атмосферной циркуляции скорее всего, отрицательный для СК региона и достаточно неопределённый для ЦЧ и ЮЗС без дополнительных исследований, привлекающих комплексные агроклиматические показатели и модельные проекции.

Выводы

Полученные оценки изменений сезонной продолжительности волн тепла и холода позволяют заключить, что в период глобального потепления летняя продолжительность волн тепла растет: существенно – на юге ЕЧР и незначительно – на юге Западной Сибири. Скорости роста очень сильно различаются: с начала 1980-х гг. в ЮЗС сезонная продолжительность волн тепла выросла на 2 дня (рост статистически незначим на уровне 5%), в ЦЧ регионе на 13 дней, а в СК регионе почти на 25 дней (эти тренды значимы на уровне 1%). При этом характерные температуры в волнах тепла юга ЕЧР существенно выше, чем в ЮЗС, примерно на 4-6 градусов для средних, и на 2-4 градуса для максимальных суточных температур.

В то же время отмечается значимое убывание сезонной продолжительности волн холода во всех регионах. В СК регионе после 2010 г. не наблюдалось ни одной волны холода. В ЮЗС с 1980-х гг. и по 2010 г. средние за

десятилетие сезонные продолжительности волн холода колебались на уровне около 2 дней, но после 2010 г. также не наблюдалось ни одной волны.

Получены оценки связи сезонной продолжительности волн тепла и холода с циркуляционными модами европейско-атлантического сектора. Волны тепла юга ЕЧР значимо связаны с модами ВАЗР и САК (волн тепла больше в отрицательной фазе этих мод), а в СК регионе еще и с модой ВАМ в положительной фазе. Волны холода в СК регионе также связаны с модой ВАМ, но в отрицательной фазе. В ЮЗС волны тепла не демонстрируют связей с рассмотренными циркуляционными модами; волны холода значимо связаны с модами ВАЗР и, в особенности, СКАНД, с обеими в положительной фазе.

Еще раз отметим неблагоприятную тенденцию на юге ЕЧР: быстрый рост средних сезонных температур (ОДЗ, 2022) совместно с постоянно убывающим в последние десятилетия индексом ВАЗР (что, видимо, связано с потеплением Северной Атлантики) даёт чрезвычайно высокую скорость роста сезонной продолжительности волн тепла и возрастающий риск сильной засухи. В то же время ЮЗС значительно менее уязвим в этом отношении, в частности, из-за относительно слабой реакции волн тепла в этом регионе на изменения атмосферной циркуляции.

Представляется, что содержащаяся в статье информация должна быть полезна при разработке мер по адаптации сельского хозяйства к условиям изменяющегося климата.

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*» АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

Список литературы

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Попов, И.О. (2023) Крупномасштабные летние волны тепла на юге Европейской России, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 5-17, doi: 10.52002/0130-2906-2023-1-5-17.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2021) Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 2, с. 57-80, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В. (2020) Изменения сезонных показателей экстремумов температуры воздуха в Москве и центральных областях Евро-

пейской части России, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 20-35.

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.

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*, № 3, с. 32-58, doi: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

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.

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*, <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>.

Кац, А.Л. (1973) *Необычное лето 1972 года*, Л., Гидрометеиздат, 60 с.

Коваленко, О.Ю., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н. (2017) Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в Причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 42-62, doi: 10.21513/2410-8758-2017-2-42-62.

Обухов, А.М., Курганский М.В., Татарская М.С. (1984) Динамические условия возникновения засух и других крупномасштабных погодных аномалий, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 5-14.

ОД (2022) *Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. Катцова В.М., Росгидромет, СПб, Научные технологии, с. 61-109.

Семенов, В.А., Черенкова, Е.А. (2018) Оценка влияния атлантической мультideкадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в атлантическом секторе в летний сезон, *Доклады Академии наук*, т. 478, № 6, с. 697-701, doi: 10.7868/S0869565218060178.

Семенов, В.А., Чернокульский, А.В., Соломина, О.Н. (2016) Влияние Атлантического долгопериодного колебания на формирование засух в Северной Евразии, *Доклады Академии наук*, т. 471, № 3, с. 354-357, doi: 10.7868/S0869565216330227.

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.*, 115, pp. 1083-1126.

Cheng X., Wallace J.M. (1993) Cluster analysis of the Northern Hemisphere wintertime 500-hPa height field: Spatial patterns, *Journal of atmospheric sciences*, v. 50, no. 16, pp. 2674-2696.

IPCC (2018) *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24, doi:10.1017/9781009157940.001.

IPCC (2021) *Climate Change 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, doi:10.1017/9781009157896.

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., Chellia, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., 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.

Molteni, F., Tibaldi, S., Palmer, T.N. (1990) Regimes in the wintertime circulation over northern extratropics. I: *Observational evidence*, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 116, no. 491, pp. 31-67.

Pelly, J.L., Hoskins, B.J. (2003) A new perspective on blocking, *Journal of Atmospheric Science*, vol. 60, no. 3, pp. 743-755.

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.

Vautard, R. (1990) Multiple weather regimes over the North Atlantic: Analysis of precursors and successors, *Monthly weather review*, vol. 118, no. 10, pp. 2056-2081.

References

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Popov, I.O. (2023) Krupnomasshtabnyye letniye volny tepla na yuge Yevropeyskoy Rossii [Large-Scale Heat Waves in the South of European Russia], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 48, no. 1, pp. 1-9, doi: 10.3103/S1068373923010016.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2021) Dolgoperiodnyye izmeneniya povtoryayemosti tsiklonov v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya [Long-period Variations of Cyclone Frequency in the Northern Extratropics], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 2, pp. 57-80, DOI:10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V. (2020) Izmeneniya sezonnykh pokazateley ekstremumov temperatury vozdukha v Moskve I tsentral'nykh oblastyakh yevropeyskoy chasti Rossii [Changes in Seasonal Air Temperature Extremes in Moscow and the Central Regions of European Russia], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 7, pp. 466-477, doi: 10.3103/S106837392007002X.

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 Surface Climate Change as Inferred from Routine Climate Monitoring Data], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 5, pp. 317-329, doi: 10.3103/S1068373920050027.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V. (2019) Dolgoperiodnyye variatsii pokazateley ekstremal'nosti temperaturenogo rezhima na territorii Rossii i ikh svyazi s izmeneniyami I krupnomasshtabnoy atmosfery tsirkulyatsii global'nym potepleniym [Long-Period Variations in Extreme Temperature Statistics in Russia as Linked to the Changes in Large-Scale Atmospheric Circulation and Global Warming], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 44, no. 12, pp. 791-801, doi: 10.3103/S106837391912001X.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2019) Izmenchivost' anticiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya [Variability of Anti-Cyclonic Activity in the Northern Extratropics], *Fundamental and Applied Climatology*, no. 3, pp. 32-58, doi: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

Bardin, M.Yu. (2007) Antitsiklonicheskaya kvazistatsionarnaya tsirkulyatsiya i yeye vliyaniye na anomalii ekstremumy temperatury vozdukha v zapadnykh oblastyakh Rossii [Anticyclonic Quasi-Stationary Circulation and its Effect on Air Temperature Anomalies and Extremes Over Western Russia], *Russian*

Meteorology and Hydrology, vol. 32, no. 2, pp. 75-84, doi: 10.3103/S106837390702001X.

Bulygina, O.N., Razuvaev, 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 data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR)], Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620942 [Certificate of state registration of the database No. 2014620942], <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#opisaniye-massiva-dannykh>.

Kats, A.L. (1973) *Neobychnoye leto 1972 goda* [The unusual summer of 1972], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 60 p.

Kovalenko, O.Yu., Bardin, M.Yu., Voskresenskaya, Ye.N. (2017) Izmeneniya kharakteristik ekstremal'nosti temperatury vozdukha v Prichernomorskom regione i ikh izmenchivost' v svyazi s krupnomasshtabnym i klimaticheskimi protsessami mezhgodovogo masshtaba [Changes in Characteristics of Air Temperature Extremes over the Black Sea Region and their Variability Associated with Interannual Large-Scale Climatic Processes], *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 2, pp. 42-62, doi: 10.21513/2410-8758-2017-2-42-62.

Obukhov, A.M., Kurganskiy, M.V., Tatarskaya, M.S. (1984) Dinamicheskiye usloviya vozniknoveniya zasukh i drugikh krupnomasshtabnykh pogodnykh anomalii [Dynamic conditions for the occurrence of droughts and other large-scale weather anomalies], *Russian Meteorology and Hydrology*, no. 10, pp. 5-14.

OD (2022) Tretiy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii [The third assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in Kattsov V.M., (ed.), Rosgidromet, High technology, Saint Petersburg, Russia, pp. 61-109.

Semenov, V.A., Cherenkova, Ye.A. (2018) Otsenka vliyaniya atlanticheskoy mul'tidekadnoy ostsillyatsii na krupnomasshtabnyuyu atmosfernyuyu tsirkulyatsiyu v atlanticheskoy sektore v letniy sezon [Evaluation of the atlantic multidecadal oscillation impact on large-scale atmospheric circulation in the Atlantic region in summer], *Doklady Earth Sciences*, vol. 478, no. 2, pp. 263-267, doi: 10.1134/S1028334X18020290.

Semenov, V.A., Chernokul'skii, A.V., Solomina, O.N. (2016) Vliyaniye Atlanticheskogo dolgoperiodnogo kolebaniya na formirovaniye zasukh v Severnoy Yevrazii [Influence of long-period oscillations on the development of droughts in Northern Eurasia], *Doklady Earth Sciences*, vol. 471, no. 1, pp. 1217-1220, doi: 10.1134/S1028334X16110234.

Cherenkova, Ye.A., Bardin, M.Yu., Platova, T., Semenov, V.A. (2020) Vliyaniye dolgoperiodnoy izmenchivosti temperatury poverkhnosti okeana v Severnoy Atlantike i izmeneniy atmosfernoy tsirkulyatsii i na povtoryayemost'

sil'nykh atmosfernykh zasukh letom na yuge Vostochno-Yevropeyskoy ravniny [Influence of North Atlantic sst variability and changes in atmospheric circulation on the frequency of summer droughts in the East European plain], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 12, pp. 819-829, doi: 10.3103/S1068373920120018.

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

Cheng, X., Wallace, J.M. (1993) Cluster analysis of the Northern Hemisphere wintertime 500-hPa height field. Spatial patterns, *Journal of atmospheric sciences*, v. 50, no. 16, pp. 2674-2696.

IPCC (2018) *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24, doi:10.1017/9781009157940.001.

IPCC (2021) *Climate Change 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, doi:10.1017/9781009157896.

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.C., 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.

Molteni, F., Tibaldi, S., Palmer, T.N. (1990) Regimes in the wintertime circulation over northern extratropics. I: Observational evidence, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 116, no. 491, pp. 31-67.

Pelly, J.L., Hoskins, B.J. (2003) A new perspective on blocking, *Journal of Atmospheric Science*, vol. 60, no. 3, pp. 743-755.

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.

Vautard, R. (1990) Multiple weather regimes over the North Atlantic: Analysis of precursors and successors, *Monthly weather review*, vol. 118, no. 10, pp. 2056-2081.

Статья поступила в редакцию (Received): 23.08.2023;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.10.2023.

Для цитирования / For citation

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Попов, И.О. (2023) Изменения статистики экстремумов температурного режима в зернопроизводящих регионах юга Европейской России и Западной Сибири, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXIV, № 3-4, с. 17-44, doi:10.21513/0207-2564-2023-3-4-17-44.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Popov, I.O. (2023) Changes in statistics of temperature extremes in crop-yielding regions of southern European Russia and Western Siberia, *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*, vol. XXXIV, no. 3-4, pp. 17-44, doi:10.21513/0207-2564-2023-3-4-17-44.