

## Региональные особенности изменения зимних экстремальных температур и осадков на территории России в 1970–2015 гг.

© 2018 г. Т.Б. Титкова<sup>1\*</sup>, Е.А. Черенкова<sup>1</sup>, В.А. Семенов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия; <sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

\*ttitkova@yandex.ru

## Regional features of changes in winter extreme temperatures and precipitation in Russia in 1970–2015

T.B. Titkova<sup>1\*</sup>, E.A. Cherenkova<sup>1</sup>, V.A. Semenov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

<sup>2</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*ttitkova@yandex.ru

Received January 15, 2018

Accepted June 22, 2018

**Keywords:** *climate change, extreme precipitation, large scale atmospheric circulation, minimum and maximum daily temperatures, Russia.*

### Summary

The space-time dynamics of the occurrence of winter extreme events is investigated on the territory of Russia in 1970–2015 on the basis of daily observations at weather stations. It was found that a whole on the territory a noticeable increase in the occurrence of days with extremely high daily temperatures and daily precipitation and a decrease in the occurrence of extremely cold days was noted. The most noticeable changes happened in the European part of Russia, where at the beginning of the XXI century occurrence of the extremes was greater than during the previous thirty years. Note also that at the beginning of XXI century in Southern Siberia increase of occurrences of both daily maximum and daily minimum temperature was concurrent. This combination appears to be caused by the increase in temperature variability in the region due to the alternation of winters with extreme frosts and warmer and wet winters. The increase in the frequency of extremely high temperatures in the European part of Russia could have been caused by both general warming and the increased influence of AMO. An increase in the frequency of extreme high and low temperatures in the south of Siberia may be due to the formation of an anticyclonic circulation anomaly with a center near the coast of the Kara Sea, which is responsible for advection of cold air masses from the northeast. As well as cyclonic formation in southern Siberia, along the eastern periphery of which temperate latitudes can receive anomalously warm air from the subtropics.

**Citation:** Titkova T.B., Cherenkova E.A., Semenov V.A. Regional features of changes in winter extreme temperatures and precipitation in Russia in 1970–2015. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (4): 486–497. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-486-497.

Поступила 15 января 2018 г.

Принята к печати 22 июня 2018 г.

**Ключевые слова:** *изменения климата, крупномасштабная атмосферная циркуляция, минимальная и максимальная суточная температура, Россия, экстремальные осадки.*

Исследована повторяемость экстремальных явлений зимой на территории России в 1970–2015 гг. на основе суточных данных наблюдений на метеостанциях. Отмечен рост повторяемости дней с высокими суточными температурами, суточными суммами осадков и уменьшение морозных дней. Самые большие изменения наблюдаются в Европейской части России. На юге Сибири в начале XXI в. одновременно увеличилась повторяемость морозных и тёплых дней, а также дней с экстремальными зимними осадками.

### Введение

В условиях глобального потепления изменяются и средние, и экстремальные значения климатических характеристик. Такие изменения могут быть весьма неоднородны в пространстве в результате региональных климатических особенностей, внутренней стохастической изменчивости атмосферной циркуляции, особенно в

высоких и средних широтах Северного полушария в зимний период [1, 2], а также нелинейности отклика циркуляции на глобальное потепление [3]. Главную роль в формировании экстремальных температур играет увеличение изменчивости, а не средних значений [4].

На территории России в период 1976–2012 гг. зимний тренд потепления составил 0,18 °С за 10 лет [5]. Вместе с ожидаемым ростом часто-

ты экстремально высоких температурных аномалий в начале XXI в. наблюдалось увеличение частоты низких отрицательных аномалий приземной температуры воздуха в обширных регионах России, прежде всего в Южной Сибири и в западных регионах. Это привело к некоторому снижению здесь средних за зимний сезон приземных температур [6, 7]. При современном потеплении до 2000 г. на большей части России скорость роста минимальной температуры по абсолютной величине была больше скорости роста максимальной температуры [8]. Анализ экстремальных температур зимнего сезона с середины 1970-х годов показал, что абсолютные значения температуры и самых холодных, и самых тёплых аномалий увеличиваются на большей части территории России в соответствии с общим ростом средней температуры [9]. В начале XXI в. относительно предыдущего тридцатилетия зимой на Европейской части России (ЕЧР) отмечаются рост числа случаев с экстремально высокими температурами в среднем на один день (выше 95% перцентиля) и уменьшение числа случаев с минимальными температурами также до одного дня (ниже 5% перцентиля). Наиболее ярко это проявляется в северных районах [10]. Общие тенденции изменения экстремальных температур зимнего сезона сопровождаются отчётливо выраженными региональными отличиями.

Изменчивость приземной температуры на территории России зимой связана с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции [11, 12]. Ускорившееся в начале XXI в. сокращение площади арктических морских льдов [13, 14] способно воздействовать на региональную и крупномасштабную циркуляцию атмосферы, в частности, приводя к росту вероятности формирования аномально холодных погодных режимов зимой над Северной Евразией [7, 15]. Около половины изменчивости потепления Северного полушария с середины 1970-х годов до начала XXI в. можно объяснить долгопериодными колебаниями температуры поверхности Северной Атлантики — Атлантической мультideкадной осцилляцией (АМО). За этот период АМО перешла от относительно холодной к тёплой фазе с увеличением потоков тепла из океана в атмосферу в Северной Атлантике и Арктике [16]. Отмечается, что в периоды устойчивых положительных аномалий температуры поверх-

ности Северной Атлантики наблюдалась перестройка крупномасштабной атмосферной циркуляции, что влияло на региональный климат как в Западной, так и в Восточной Европе [17–19].

Потепление климата сопровождается увеличением влагоёмкости атмосферы, а также изменениями в режиме осадков [20, 21]. Наблюдаемые положительные тенденции в режиме приземной температуры воздуха в целом по России сопровождаются менее выраженными положительными тенденциями годовых сумм атмосферных осадков. Зимой на большей части ЕЧР отмечается рост числа дней с аномально большим количеством осадков (>10 мм), а на большей части всей страны увеличивается число дней без осадков зимой [5]. Вывод об увеличении интенсивности экстремальных осадков в целом на территории России сделан в работе [22]. Рост экстремально сильных осадков зимой в последние десятилетия наблюдался практически на всей территории России, за исключением Чукотского полуострова [9].

Цель настоящей работы — исследовать региональные особенности изменений пространственно-временной динамики экстремальных суточных температур и осадков на территории России по данным метеорологических станций за период 1970–2015 гг.

### Данные и методика исследований

Исследование пространственно-временной динамики экстремальных температур и осадков выполнено на основе суточных данных наблюдений на 527 метеостанциях из архива ВНИИГМИ-МЦД ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)). События экстремальных температур в зимний сезон (декабрь–февраль) определялись как дни с превышением максимальной суточной температуры 95% перцентиля и опусканием минимальной суточной температуры ниже 5% перцентиля эмпирических функций распределения максимальных и минимальных суточных температур соответственно. В настоящем исследовании мы использовали два последовательных периода, относящихся на время интенсивного повышения глобальной температуры в последние 30 лет XX в. и её стабилизации вблизи максимальных значений (за время инструментальных наблюдений) в

начале XXI в. В качестве базового периода принимался временной интервал 1970–1999 гг., а в качестве современного периода – 2000–2015 гг.

Измеренное на метеостанции количество осадков классифицировалось как экстремально большое, если оно превышало пороговое значение 95% перцентиля осадков для этой метеостанции, рассчитанное за базовый период. В расчёт принимались временные ряды, в которых пропуски в наблюдениях составляли не более 10%. Анализировались изменения статистических характеристик (средние значения, изменчивость, повторяемость, экстремальные события) выбранных параметров для периода 2000–2015 гг. по сравнению с периодом 1970–1999 гг. Для станций юга Сибири за зимний период рассматривалось изменение распределения плотности вероятностей для нормированных рядов  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$ . Для каждой станции в обозначенном квадрате значения нормировались на стандартное отклонение, а затем осреднялись. Для оценки влияния крупномасштабной атмосферной циркуляции использовались среднемесячные данные высоты геопотенциальной поверхности на уровне 500 гПа из глобального сеточного архива реанализа NCEP/NCAR пространственного разрешения  $2^\circ \times 2^\circ$  (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.nmc.reanalysis.html>), а также среднемесячные данные давления на уровне моря из глобального сеточного архива HadSLP2 Центра Гадлея метеослужбы Великобритании пространственного разрешения  $5^\circ \times 5^\circ$  (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.hadslp2.html>). Оценка значимости изменений повторяемости выполнена с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$ . Статистическая значимость изменений среднеквадратичных отклонений оценивалась с помощью теста Фишера. Для оценки статистических изменений  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  аномалий высоты геопотенциала и давления на уровне моря использовался критерий Стьюдента.

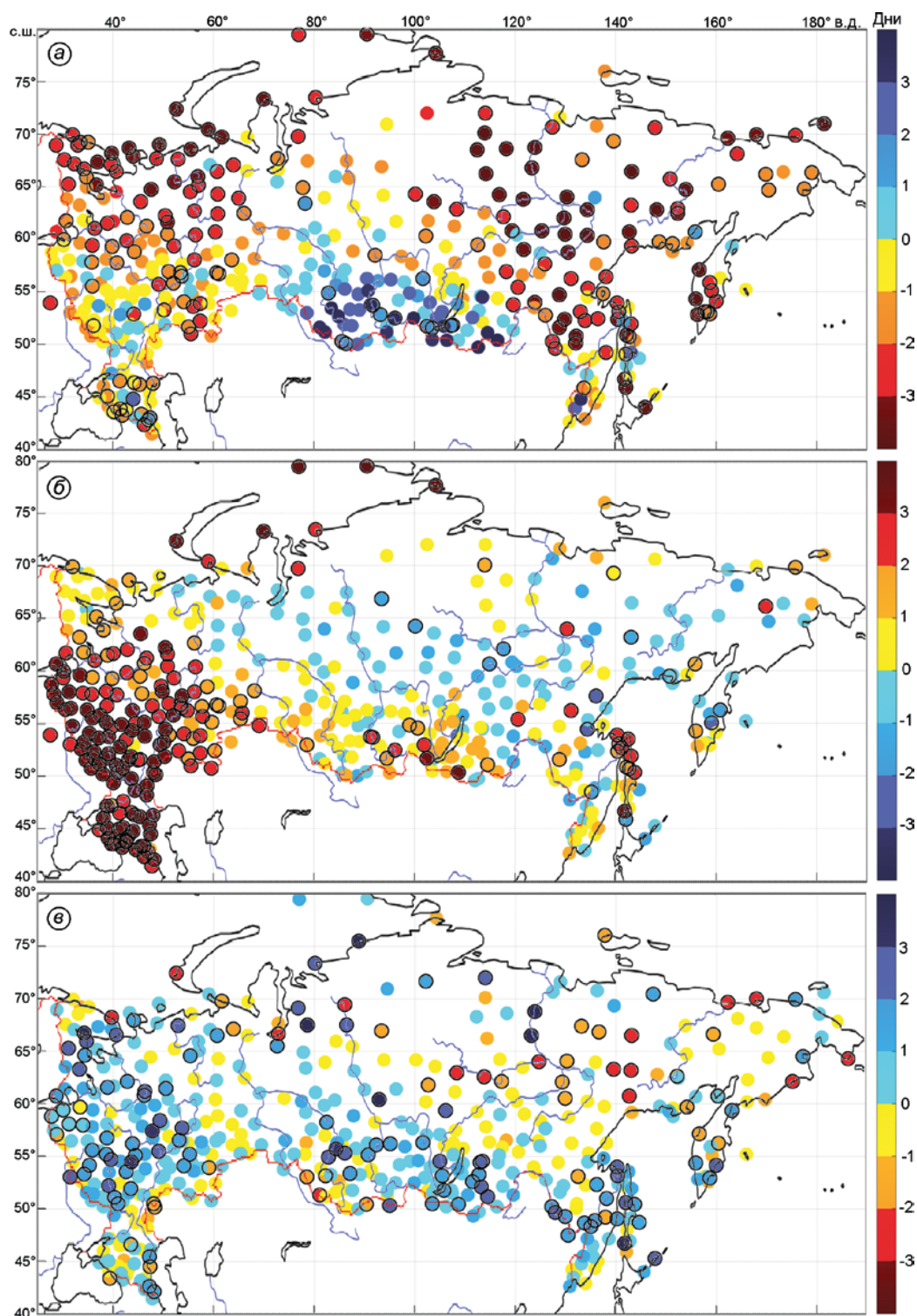
### Анализ результатов

Исследование изменений *повторяемости экстремально холодных дней* показало, что зимой в период 2000–2015 гг. относительно 1970–1999 гг. их число существенно уменьшилось практически повсеместно севернее  $60^\circ$  с.ш.,

что согласуется с последствиями ускоренного потепления в Арктике [23], в том числе в связи с колебаниями климата в Северной Атлантике [24, 25]. Особенно ярко это проявилось на островах Арктического бассейна, на севере и в центральной части Европейской России, а также в центральных районах Якутии (более четырёх дней). Число дней с экстремально низкими температурами уменьшилось в среднем на четыре дня на Камчатке и в дальневосточных регионах России (рис. 1, а). На фоне общего уменьшения экстремально холодных дней на территории России выделяются обширный регион на юге Сибири и заметное число станций в Забайкалье, где с начала XXI в. в среднем за сезон наблюдалось увеличение повторяемости дней с экстремальными морозами.

В начале XXI в. во многих регионах России в зимний период заметно растёт повторяемость дней с *экстремально высокими суточными температурами* – два случая за сезон в среднем в период 2000–2015 гг. относительно среднего в период 1970–1999 гг. (см. рис. 1, б). Наиболее существенно и статистически значимо это проявилось на ЕЧР, особенно в южной её части (что согласуется с выводами, полученными в статье [26]), и на островах Арктического бассейна, а также на юге Западной Сибири и Сахалине. Здесь за последние 16 лет зимой стали чаще (в среднем на один день и более) наблюдаться экстремально высокие суточные температуры. В центральных районах Сибири, в бассейнах рек Лены и Вилюя, увеличение повторяемости экстремально высоких температур не наблюдалось, изменения, в том числе отрицательные, как правило, не превысили одного дня, что статистически не значимо.

Рост числа дней с *экстремальными суточными суммами осадков* в зимний период 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг. отмечается в основном в ЕЧР и на юге Сибири, на территориях с наибольшей плотностью населения. Повторяемость таких событий зимой статистически значимо увеличилась в среднем на 20% на большей части ЕЧР (на 1–3 дня), на востоке Новосибирской и на западе Кемеровской областей (на 2–3 дня), в Забайкалье (на 1–2 дня), на Дальнем Востоке (на 2 дня) (см. рис. 1, в). Полученные результаты согласуются с выводами об увеличении интенсивности экстремальных осадков в 1961–2013 гг. зимой в верховьях р. Обь [22]. Вместе с тем достаточно об-

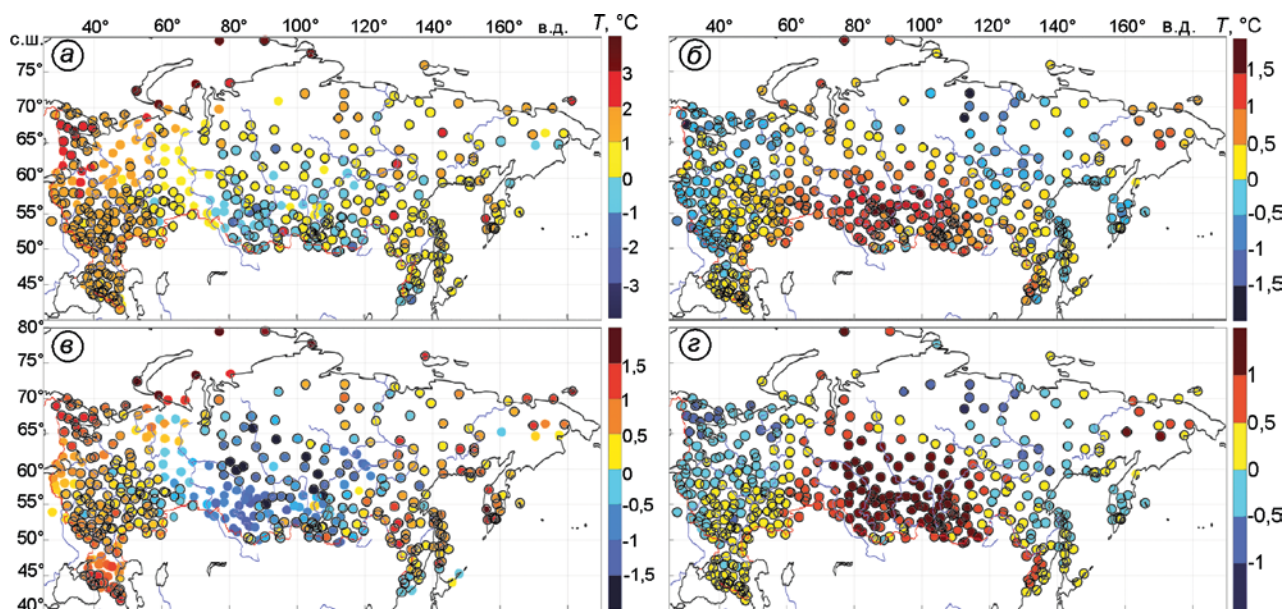


**Рис. 1.** Изменение повторяемости (число дней за сезон) экстремальных событий в период 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг. в зимний период:

*a* – минимальных (ниже 5% перцентиля) суточных температур; *б* – максимальных (выше 95% перцентиля) суточных температур; *в* – суточных сумм осадков (выше 95% перцентиля); кругами с чёрной окантовкой показаны статистически значимые изменения по критерию Пирсона  $\chi^2$

**Fig. 1.** Changes in the frequency of occurrence (days per season) of extreme events during the 2000–2015 period relative to 1970–1999 period for the winter:

*a* – minimum (below 5% percentile) daily temperatures; *b* – maximum (above 95% percentile) daily temperatures; *c* – daily precipitation (above 95% percentile); circles with black edging show statistically significant changes according to the Pearson  $\chi^2$  test



**Рис. 2.** Изменение зимней минимальной суточной температуры  $T_{\min}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) за период 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг. (*a* – средней за период и *б* – её среднеквадратического отклонения), а также максимальной суточной температуры  $T_{\max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) (*в* – средней за период и *г* – её среднеквадратического отклонения). Кругами с чёрной окантовкой показаны статистически значимые изменения  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  по критерию Стьюдента и стандартного отклонения межсуточного изменения температур по критерию Фишера с вероятностью 0,95

**Fig. 2.** Changes between 2000–2015 period relative to 1970–1999 period of: *a* – averaged minimum daily temperature  $T_{\min}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); *б* –  $T_{\min}$  standard deviation; *в* – averaged maximum daily temperature  $T_{\max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); *г* –  $T_{\max}$  standard deviation. Circles with black edging show statistically significant changes in  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  estimated by Student's t-test and statistically significant changes of the variability estimated by Fisher test both with a probability of 0.95

ширные области значимого уменьшения частоты экстремальных суточных осадков в среднем на 40% по сравнению с нормой наблюдались в Алтайском крае (на 2 дня), в центре Восточной Сибири (на 2 дня) и на Северо-Востоке России, включая Чукотский полуостров, (на 1–3 дня).

На большей части территории России наблюдается уменьшение повторяемости экстремально холодных дней зимой и увеличение повторяемости экстремально тёплых дней. При этом обращает на себя внимание сочетание одновременно увеличившейся повторяемости морозных дней более чем на четыре дня, т.е. примерно в 2 раза (см. рис. 1, *a*), экстремально тёплых дней на 2–3 дня (см. рис. 1, *б*) и дней с экстремальными осадками на 1–2 дня (см. рис. 1, *в*) на юге Сибири. Кроме того, отмечаются и различия внутри региона: в Прибайкалье и Забайкалье по сравнению с Алтайским краем наблюдался более сильный рост экстремально тёплых дней и дней с экстремальными осадками (см. рис. 1, *б*, *в*).

Регион Центральной Сибири выделяется и при анализе изменений средних величин мини-

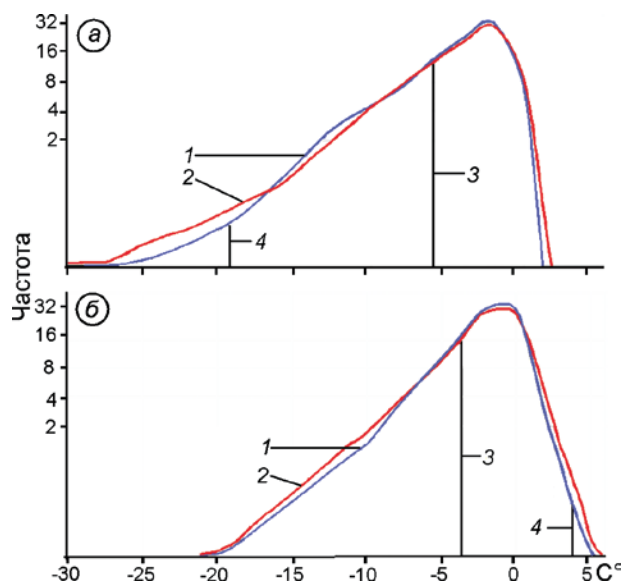
мальной и максимальной температуры и их изменчивости (рис. 2). В этом регионе (главным образом в его южной части) происходит уменьшение минимальных  $T_{\min}$  и максимальных температур  $T_{\max}$ , контрастирующее с их общим повышением в начале XXI в. практически во всех других регионах России. Особенно ярко это выражено для  $T_{\max}$  (см. рис. 2, *в*). Центральный регион Сибири также выделяется статистически значимым увеличением внутрисезонной изменчивости  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  на фоне уменьшения изменчивости на ЕЧР и в Восточной Сибири (за исключением Камчатки) (см. рис. 2, *б*, *г*). Отметим, что температурные изменения средних значений  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  сопровождаются увеличением их изменчивости.

Региональные особенности изменений повторяемости случаев экстремальной минимальной и максимальной суточной температуры воздуха зимой согласуются с изменением статистических характеристик функции плотности распределения вероятностей (ФПРВ). Хотя ФПРВ суточной температуры и её экстремумов могут существенно отличаться от нормального распре-



деления (например, для Москвы [27]), увеличение стандартного отклонения ФПРВ  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  сопровождается нелинейным ростом положительных и отрицательных аномалий. При оценке «левого» хвоста распределения  $T_{\min}$  увеличение её среднего значения (см. рис. 2, *a*) и уменьшение её изменчивости (см. рис. 2, *б*) на севере и западе ЕЧР, севере Восточной Сибири, на п-ове Камчатка и на о. Сахалин в период 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг. вызвало снижение повторяемости на той же территории числа случаев экстремальных минимальных температур (см. рис. 1, *a*) при сохранении пороговых значений экстремумов. Вместе с тем рост повторяемости экстремально холодных дней согласуется с уменьшением средней минимальной температуры и увеличением её изменчивости на Алтае, в Прибайкалье и Забайкалье (см. рис. 2, *a, б*). Пример распределения плотности вероятностей для нормированных рядов  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  для станций юга Сибири приведён на рис. 3.

В общем случае увеличение значений обеих статистических характеристик минимальной температуры, как и их одновременное уменьшение, может привести к неопределённости в направленности повторяемости экстремальных значений. В этом случае результат зависит от статистической значимости/незначимости изменений и соотношения между ними. Например, увеличение средней минимальной температуры и её изменчивости (см. рис. 2, *a, б*) на юге и юго-востоке ЕЧР приводило к разнонаправленности повторяемости экстремально холодных зимних дней (см. рис. 1, *a*), а в Прибайкалье, на Дальнем Востоке и Чукотском полуострове оно ассоциировалось, как правило, с более частой повторяемостью экстремально холодных зимних дней. Поскольку для  $T_{\max}$  мы оцениваем «правый» хвост распределения, соотношения направленности изменений статистик  $T_{\max}$  и повторяемости её экстремумов отличаются от аналогичных соотношений для  $T_{\min}$ , рассмотренных здесь ранее. Так, увеличение средней  $T_{\max}$  и её изменчивости на юге и юго-востоке ЕЧР (см. рис. 2, *в, г*) в период 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг. приводило к росту повторяемости дней с экстремальными  $T_{\max}$  на этой территории (см. рис. 1, *б*). При противоположно направленных изменениях средней максимальной температуры и её изменчивости (при условии её нормального распределения) возмож-



**Рис. 3.** Распределение плотности вероятностей нормированных рядов для станций юга Сибири (10 станций в квадрате 50–55° с.ш., 80–100° в.д.): *a* –  $T_{\min}$ ; *б* –  $T_{\max}$ ; цифрами обозначено: 1 – 1970–1999 гг.; 2 – 2000–2015 гг.; 3 – среднее; 4 – перцентиль 5 (95)%

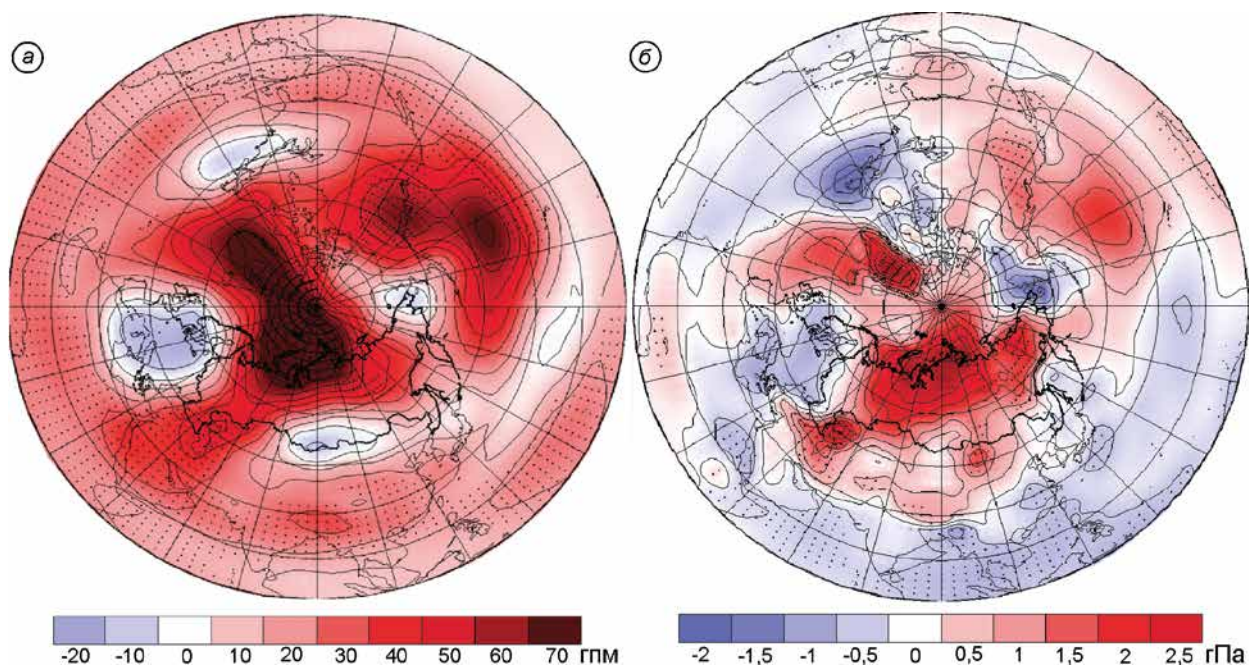
**Fig. 3.** Distribution of probability density of normalized series for stations in the south of Siberia (10 stations in a square 50–55° N, 80–100° E):

*a* –  $T_{\min}$ ; *б* –  $T_{\max}$ ; the figures are: 1 – 1970–1999; 2 – 2000–2015; 3 – mean; 4 – percentile 5 (95)%

но как увеличение, так и уменьшение повторяемости экстремумов температуры.

Схематическое объяснение возможной повторяемости экстремумов температуры при разной направленности изменений среднего и дисперсии при переходе от «старого» к «новому» климату приведено на рис. 1.7.1 в работе [5]. Таким образом, экстремально морозные дни на юге Сибири в 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг. стали наблюдаться чаще (см. рис. 1, *a*) (при увеличении дисперсии средней минимальной температуры на 1,5–2 °С). Преобладающий рост числа экстремально тёплых дней в этом регионе также сопровождается значительным (на 1,5 °С) увеличением дисперсии  $T_{\max}$  и уменьшением средних значений  $T_{\max}$  на 1–1,5 °С.

Особенности изменений температурного режима на юге Сибири связаны с аномалиями атмосферной циркуляции в начале XXI в. Анализ изменений высоты геопотенциала на уровне 500 гПа  $Z_{500}$  (рис. 4, *a*) показал, что самой значительной аномалией  $Z_{500}$  в период 2000–2015 гг. над Северным полушарием была положитель-



**Рис. 4.** Изменение аномалии высоты геопотенциала на уровне 500 гПм (*а*) и давления на уровне моря зимой (гПа) (*б*) в 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг.

Статистически значимые изменения по критерию Стьюдента показаны точками

**Fig. 4.** Change of the of the 500 hPa geopotential height (m) (*a*) and sea level pressure in winter (hPa) (*b*) between the 2000–2015 period relative to 1970–1999 period.

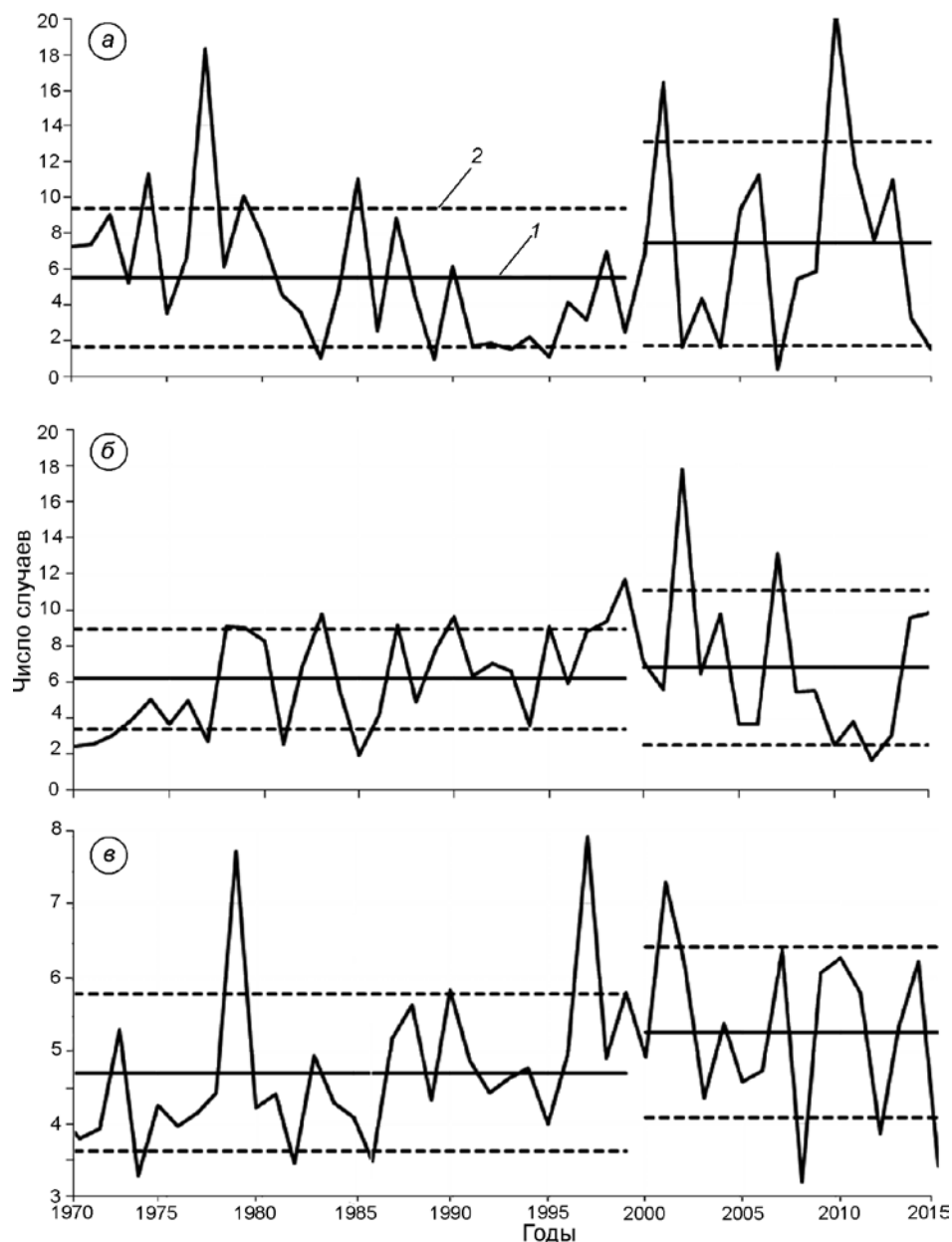
Statistically significant changes (with 0.95 probability) estimated by the Student's t-test are indicated by points

ная (антициклоническая) аномалия с центром над Баренцевым и Карским морями. Антициклоническая аномалия отмечается и в поле атмосферного давления на уровне моря (см. рис. 4, *б*). Такая аномалия циркуляции приводит к аномальной адвекции холодных континентальных воздушных масс из северо-восточной части России в южные регионы Западной Сибири, а также ослабляет западный перенос над ЕЧР и Центральной Сибирью. Это приводит к увеличению повторяемости экстремально холодных дней и частичному уменьшению экстремально тёплых дней и дней с экстремальными осадками. Рост повторяемости экстремально тёплых дней может быть связан как с общим потеплением в западных и юго-западных регионах Евразии, так и с циклонической аномалией на юге Сибири, по восточной периферии которой в умеренные широты поступает воздух из субтропиков.

Причина формирования антициклонической аномалии атмосферной циркуляции к югу от Баренцева моря в начале XXI в. — предмет многочисленных исследований в последние годы из-за участвовавших аномально низких зимних темпе-

ратур воздуха, в том числе и в Европе, на фоне рекордно высоких значений глобальной температуры; см., например, обзоры [28, 29]. Результаты анализа эмпирических данных и численных экспериментов с моделями атмосферы указывают на роль сокращения площади морских льдов в Арктике, в том числе в Баренцевом море, в формировании антициклонической аномалии [7, 27]. Предлагается несколько механизмов такого отклика, вызванного аномальным нагревом арктической атмосферы, уменьшением меридионального градиента тепла, аномальной волновой и вихревой активностью [6, 28, 29].

Анализ изменений повторяемости экстремальных значений  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  и осадков по данным 77 метеостанций на юге Сибири в квадрате 50–60° с.ш., 70–120° в.д., куда входят Омская, Новосибирская, Кемеровская, Томская, Иркутская области, южная часть Красноярского края, Алтайский край, Республики Алтай, Тыва, Хакасия, Бурятия (рис. 5), указывает на увеличение числа случаев с экстремальными температурами в отдельные годы в период 2000–2015 гг. (при относительно небольших изменениях средних



**Рис. 5.** Изменение повторяемости числа случаев наблюдений:

экстремальной минимальной (а) и экстремальной максимальной (б) суточной температуры воздуха, а также экстремальных суточных сумм осадков (е), осреднённых по данным 77 метеостанций на юге Сибири в квадрате 50–60° с.ш., 70–120° в.д. зимой в период 1970–2015 гг.

Цифрами показано: 1 – среднее; 2 – среднеквадратическое отклонение

**Fig. 5.** Frequency of occurrence of the observed:

extreme minimum (a) and extreme maximum (b) daily surface air temperature, as well as (e) extreme daily precipitation averaged over 77 meteorological stations in the Southern Siberia, 50–60° N, 70–120° E, in the winter for the 1970–2015 period. The numbers indicate: 1 – average; 2 – standard deviation

за выбранные периоды значений), в то время как для повторяемости экстремальных осадков можно отметить достаточно устойчивый рост повторяемости с начала 1970-х годов. Как видно (см. рис. 5, а), существенный вклад в формиро-

вание положительных изменений повторяемости экстремальной минимальной температуры в регионе в период 2000–2015 гг. по сравнению с 1970–1999 гг. внесли 2001, 2006, 2010, 2013 гг. – годы наибольшей повторяемости очень холод-



ных зимних дней на большинстве метеостанций. В противоположность аномально холодным зимам 2002, 2004, 2007, 2014 гг. наблюдалось наибольшее число дней с экстремально высокой температурой. В эти же годы прослеживается и значительное число дней с экстремальными осадками (см. рис. 5, в). Важно, что период 1988–1999 гг. характеризуется зимами с невысокой повторяемостью на юге Сибири температурных экстремумов обоих типов (см. рис. 5, а, б). Напротив, в периоды 1983–1986 и 2000–2015 гг. преобладали температурные экстремумы одного типа, т.е. чередование тёплых и влажных зим с зимами с экстремальными морозами.

### Обсуждение и выводы

Анализ пространственно-временной динамики экстремальных явлений на территории России на основе данных наблюдений на метеостанциях показал, что зимний период в 2000–2015 гг. относительно периода 1970–1999 гг. в большинстве регионов России отмечался уменьшением числа повторяемости экстремально морозных дней (см. рис. 1, а), в частности: на островах Арктического бассейна, в ЕЧР (особенно в её северной части), в Центральной Сибири, в регионах Дальнего Востока. Также заметен рост повторяемости дней с экстремально высокими суточными температурами: с максимальным ростом – на Арктическом побережье, в южной части Европейской России, на юге Сибири и на Сахалине и незначительным уменьшением – в центральных районах Сибири (см. рис. 1, б). Эти изменения сопровождаются увеличением числа дней с экстремальными суточными суммами осадков на ЕЧР, юге Сибири и в отдельных регионах Дальнего Востока (см. рис. 1, в).

Максимум увеличения повторяемости рассмотренных характеристик на ЕЧР может быть связан с изменением фазы АМО, которая перешла от отрицательной фазы в середине 1970-х годов к пику положительной фазы в начале XXI в. Такие изменения, как показывают модельные расчёты, приводят к потеплению над Северной Евразией с максимальными значениями в её западных регионах [30, 31]. Температурные изменения средних значений  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  сопровождаются трансформацией их из-

менчивости. Так, центральный регион Сибири выделяется статистически значимым увеличением внутрисезонной изменчивости  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  на фоне уменьшения изменчивости на ЕЧР и в Восточной Сибири (см. рис. 2, б, г).

Таким образом, важная особенность современных изменений характеристик экстремальных температур на территории России – *рост повторяемости экстремально низких температур, а также средних значений  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  на юге Сибири*, контрастирующий с общими тенденциями на остальной территории страны. При этом отмечается также рост повторяемости экстремально тёплых дней и дней с экстремальными осадками. Эти изменения сопровождаются значительным ростом внутрисезонной изменчивости данных характеристик. Если увеличение повторяемости экстремально тёплых аномалий на ЕЧР может объясняться общим потеплением со значительным вкладом АМО в последние десятилетия, то увеличение повторяемости как экстремально высоких, так и низких температур на юге Сибири может быть связано с формированием антициклонической аномалии циркуляции с центром вблизи побережья Карского моря, ответственной за адвекцию холодных воздушных масс с северо-востока, и циклонического образования (см. рис. 4, а), по восточной периферии которого в умеренные широты может поступать аномально тёплый воздух из субтропиков.

Полученные результаты показывают, что общая тенденция к уменьшению изменчивости температуры в высоких и средних широтах Северного полушария в последние десятилетия, связанная с уменьшением меридионального градиента температуры [23], может сопровождаться такими региональными особенностями, как выявленное в данной работе увеличение изменчивости в обширном регионе Южной Сибири в начале XXI в. Такие изменения могут быть связаны с аномалиями атмосферной циркуляции (прежде всего – с антициклонической аномалией над Центральной Сибирью) в этот период [29].

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00647) в части исследования изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции Северного полушария в высоких широтах, а также в рамках программы президиума РАН № 51. Анализ изменений экстремальных

характеристик климата выполнен в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 17-05-00561).

**Acknowledgments.** The work was supported by the Russian Science Foundation (project № 14-17-00647) in part of a study of changes in large-scale at-

mospheric circulation of the Northern Hemisphere in high latitudes, and also within the framework of the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences № 51. An analysis of changes in extreme climate characteristics was carried out within the framework of the project of the Russian Foundation for Basic Research (№ 17-05-00561).

## Литература

1. *Semenov V.A., Latif M., Park W., Jungclaus J.H.* Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? // *Geophys. Research Letters*. 2008. V. 35. № 11. P. L11701. doi: 10.1029/2008GL033273.
2. *Демченко П.Ф., Семенов В.А.* Оценка неопределённости климатических трендов приповерхностной температуры, связанной с внутренней динамикой атмосферы // *ДАН*. 2017. Т. 476. № 3. С. 339–342. doi: 10.7868/S0869565217270202.
3. *Overland J., Dethloff K., Francis J., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Screen J., Shepherd T.G., Vihma T.* Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic // *Nature Climate Change*. 2016. V. 6. P. 992–999. doi: 10.1038/NCLIMATE3121.
4. *Katz R., Brown B.G.* Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages // *Journ. of Climatic Change*. 1992. V. 21. P. 289–302.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Главы: 1.2.3.; 1.3.2. М.: изд. Росгидромета, 2014. 1009 с.
6. *Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J.* Recent Arctic amplification and extreme midlatitude weather // *Nature Geoscience*. 2014. V. 7. P. 627–637. doi: 10.1038/NGEO2234.
7. *Семенов В.А.* Связь аномально холодных зимних режимов на территории России с уменьшением площади морских льдов в Баренцевом море // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 3. С. 257–266. doi: 10.7868/S000235151603010X.
8. *Платова Т.В.* Годовые экстремумы температуры воздуха на территории Российской Федерации и их климатические изменения // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 11. С. 80–85.
9. *Бардин М.Ю., Платова Т.В.* Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2013. № 25. С. 71–93.
10. *Туткова Т.Б.* Изменение характера температурного режима Европейской части России // *Севастополь: изд. Ин-та природно-технических систем*.

## Reference

1. *Semenov V.A., Latif M., Park W., Jungclaus J.H.* Is the observed NAO variability during the instrumental record unusual? *Geophys. Research Letters*. 2008, 35 (11): L11701. doi: 10.1029/2008GL033273.
2. *Demchenko P.F., Semenov V.A.* Estimation of uncertainty in surface air temperature climatic trends related to the internal dynamics of the atmosphere. *Doklady Akademii Nauk. Reports of the Academy of Sciences*. 2017, 476 (3): 339–342. doi: 10.7868/S0869565217270202. [In Russian].
3. *Overland J., Dethloff K., Francis J., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Screen J., Shepherd T.G., Vihma T.* Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic. *Nature Climate Change*. 2016, 6: 992–999. doi: 10.1038/NCLIMATE3121.
4. *Katz R., Brown B.G.* Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Journ. of Climate Change*. 1992, 21: 289–302.
5. *Vtoroy otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii*. Glava 1.2.3.; 1.3.2. The second estimated report of Roshydromet on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation. Ch. 1.2.3.; 1.3.2. Moscow: Roshydromet, 2014: 1009 p. [In Russian].
6. *Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J., Jones J.* Recent Arctic amplification and extreme midlatitude weather. *Nature Geoscience*. 2014, 7: 627–637. doi: 10.1038/NGEO2234.
7. *Semenov V.A.* The connection of anomalously cold winter regimes on the territory of Russia with a decrease in the area of sea ice in the Barents Sea. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean. 2016, 52 (3): 257–266. doi: 10.7868/S000235151603010X. [In Russian].
8. *Platova T. V.* Annual extremes of air temperature in the territory of the Russian Federation and their climate changes. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Russian Meteorology and Hydrology. 2008, 11: 80–85. [In Russian].
9. *Bardin M. Yu., Platova T. V.* Changes in thresholds of extreme temperatures and precipitation on territory of Russia with global warming. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems. 2013, 25: 71–93. [In Russian].

- Сб. трудов Междунар. науч.-технич. конф. «Системы контроля окружающей среды – 2017». Т. 1. 2017. С. 124.
11. Попова В.В., Шмакин А.Б. Циркуляционные механизмы крупномасштабных аномалий зимней температуры воздуха в Северной Евразии в конце XX столетия // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 15–24.
  12. Крыжов В.Н. Связь средней годовой температуры воздуха в Северо-Западной Евразии с арктическим колебанием // Метеорология и гидрология. 2004. № 1. С. 5–14.
  13. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из Космоса. 2013. № 4. С. 50–65. doi: 10.7868/S0205961413040076.
  14. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.
  15. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование // Лёд и Снег. 2013. № 2 (122). С. 53–62. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-53-62.
  16. Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The impact of north atlantic-arctic multidecadal variability on northern hemisphere surface air temperature // Journ. of Climate. 2010. V. 23. № 21. P. 5668–5677.
  17. Черенкова Е.А., Семенов В.А. Связь зимних осадков на территории Европы с изменениями ледовитости Арктического бассейна, температуры океана и атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 38–52.
  18. Черенкова Е.А. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 5. С. 72–81. doi: 10.7868/S0373244417050061.
  19. Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation // Geophys. Research Letters. 2006. V. 33. P. 17706.
  20. Киктев Д.В., Сизе Д., Александр Л. Сравнение многолетних средних и тенденций изменения ежегодных экстремумов температуры и осадков по данным моделирования и наблюдений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 305–315.
  21. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремаль-
  22. Titkova T.B. Change in the nature of the temperature regime in the European part of Russia. Sevastopol: Institut prirodno-tekhnicheskikh system. Sb. trudov. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy – 2017». Intern. Scientific and Technical Conf. «Environmental Monitoring Systems – 2017». 2017, 1: P. 124. [In Russian].
  23. Popova V.V., Shmakin A.B. Circulation mechanisms of large-scale anomalies of winter air temperature in Northern Eurasia at the end of the 20th century. Meteorology and hydrology. Russian Meteorology and Hydrology. 2006, 12: 15–24. [In Russian].
  24. Kryzhov V.N. Relationship between annual mean air temperature in northwestern Eurasia and the arctic oscillation. Meteorology and hydrology. Russian Meteorology and Hydrology. 2004, 1: 5–14. [In Russian].
  25. Ivanov V.V., Alekseyev V.A., Alekseyeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal? Issledovaniye Zemli iz Kosmosa. Exploring the Earth from Space. 2013, 4: 50–65. doi: 10.7868/S0205961413040076. [In Russian].
  26. Semenov V.A., Martin T., Behrens L.K., Latif M., Astafieva E.S. Arctic sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models' ensembles. Led i Sneg. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 77–107. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107. [In Russian].
  27. Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.C., Pogarsky F.A. Change of sea ice content in the Arctic and the associated climatic effects: detection and simulation. Led i Sneg. Ice and Snow. 2013, 2 (122): 53–62. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-53-62. [In Russian].
  28. Semenov V.A., Latif M., Dommenges D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The impact of north atlantic-arctic multidecadal variability on northern hemisphere surface air temperature. Journ. of Climate. 2010, 23 (21): 5668–5677.
  29. Cherenkova E.A., Semenov V.A. A link between winter precipitation in Europe and the arctic sea ice, sea surface temperature, and atmospheric circulation. Meteorologiya i hydrologiya. Russian Meteorology and Hydrology. 2017, 4: 38–52. [In Russian].
  30. Cherenkova E.A. Seasonal precipitation in the East European Plain during the periods of warm and cool anomalies of the North Atlantic surface temperature. Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. Proc. of the Russian Academy of Sciences. Geographic series. 2017, 5: 72–81. doi: 10.7868/S0373244417050061. [In Russian].
  31. Knight J.R., Folland C.K., Scaife A.A. Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation. Geophys. Research Letters. 2006, 33: 17706.
  32. Kiktev D.B., Caesar J., Alexander L. Temperature and precipitation extremes in the second half of the twentieth century from numerical modeling results and observational data. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Proc. of the Russian Academy of Sciences.

- ных осадков в России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. № 1. С. 84–103.
22. Zolotokrylin A., Cherenkova E. Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population // *Geography, environment, sustainability*. 2017. V. 10. № 4. P. 69–82. doi: <http://dx.doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-69-82>.
  23. Screen J.A. Arctic amplification decreases temperature variance in northern mid- to high-latitudes // *Nature Climate Change*. 2014. V. 4. P. 577–582. doi: [10.1038/NCLIMATE2268](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2268).
  24. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390. doi: [10.15356/2076-6734-2017-3-381-390](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390).
  25. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
  26. Коваленко О.Ю., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н. Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. № 2. С. 42–62.
  27. Шукуров К.А., Семенов В.А. Характеристики зимних аномалий приземной температуры воздуха в Москве в 1970–2016 гг. при сокращении площади морских льдов в Баренцевом море // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 1. С. 13–27. doi: [10.7868/S0003351518010026](https://doi.org/10.7868/S0003351518010026).
  28. Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review // *Surveys in Geophysics*. 2014. V. 35. P. 1175–214.
  29. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 2. С. 16–28.
  30. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Рекнер Э. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями Атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам // *ДАН*. 2008. Т. 419. № 5. С. 687–690.
  31. Семенов В.А., Шелехова Е.А., Мохов И.И., Зуев В.В., Колтерманн П. Роль Атлантического долгопериодного колебания в формировании сезонных аномалий температуры воздуха в Северном полушарии по модельным расчетам // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27. № 3. С. 215–223.
  - Physics Atmospheric and Oceanic. 2009, 45 (3): 305–315. [In Russian].
  21. Zolina O.G., Bulygina O.N. Current climatic variability of extreme precipitation in Russia. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2016, 1: 84–103. [In Russian].
  22. Zolotokrylin A., Cherenkova E. Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population. *Geography, environment, sustainability*. 2017, 10 (4): 69–82. doi: <http://dx.doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-69-82>.
  23. Screen J.A. Arctic amplification decreases temperature variance in northern mid- to high latitudes. *Nature Climate Change*. 2014, 4: 577–582. doi: [10.1038/NCLIMATE2268](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2268).
  24. Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.Ye., Ivanov N.E., Smirnov A.V. Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 381–390. doi: [10.15356/2076-6734-2017-3-381-390](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390). [In Russian].
  25. Semenov V.A., Mokhov I.I., Latif M. Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in Eurasia in recent decades. *Izvestiya RAN. Fizika Atmosfery i Okeana*. Physics Atmospheric and Oceanic. 2012, 48 (4): 403–421. [In Russian].
  26. Kovalenko O.Yu., Bardin M.Yu., Voskresenskaya E.N. Changes in characteristics of air temperature extremes over the Black Sea region and their variability associated with interannual large-scale climatic processes. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2017, 2: 42–62. [In Russian].
  27. Shukurov K.A., Semenov V.A. Changes of characteristics of Moscow winter surface air temperature anomalies in 1970–2016 in a context of the Barents Sea ice reduction. *Izvestiya RAN. Fizika Atmosfery i Okeana*. Physics Atmospheric and Oceanic. 2018, 54 (1): 13–27. doi: [10.7868/S0003351518010026](https://doi.org/10.7868/S0003351518010026). [In Russian].
  28. Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review. *Surveys in Geophysics*. 2014, 35: 1175–214.
  29. Mokhov I.I., Semenov V.A. Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change. *Meteorologiya i hydrologiya*. Russian Meteorology and Hydrology. 2016, 2: 16–28. [In Russian].
  30. Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch., Latif M., Rekner E. The relationship between climate anomalies of Eurasia and the North Atlantic with natural variations of the Atlantic thermohaline circulation over long-period model calculations. *Doklady Akademii nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2008, 419 (5): 687–690. [In Russian].
  31. Semenov V.A., Shelekhova E.A., Mokhov I.I., Zuyev V.V., Koltermann P. The role of the Atlantic long-period oscillation in the formation of seasonal air temperature anomalies in the Northern Hemisphere according to model calculations. *Optika Atmosfery i Okeana*. Optics of the Atmosphere and the Ocean. 2014, 27 (3): 215–223. [In Russian].