

УДК 911.6-911.7

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА СИБИРИ

Л. М. КИТАЕВ¹⁾, Т. Б. ТИТКОВА¹⁾, М. А. АЛЕШИНА¹⁾

¹⁾Институт географии РАН, пер. Старомонетный, 29, стр. 4, 119017, г. Москва, Россия

Аннотация. Продолжительное (до семи месяцев в году) залегание снежного покрова на севере Евразии определяет возможность влияния изменчивости величины и частоты проявления экстремумов снегозапасов на скорость и направление изменений климата и водного баланса. В связи с этим проведена оценка многолетней изменчивости средних и экстремальных (процентили 5 и 95 %) значений толщины снежного покрова в Сибири с учетом особенностей метеорологического режима региона в 1976–2022 гг. С использованием данных наблюдений метеорологических станций выявлены преобладающие на территории положительные многолетние тенденции изменений средних значений и экстремумов толщины снежного покрова (более 1,5 см за 10 лет) на фоне увеличения средних значений и экстремумов приземной температуры воздуха (от 0 до 2,5 °C за 10 лет) и осадков (более 0,40 и 0,04 мм за 10 лет для средних значений и максимальных экстремумов, а также 0,2–1,0 дня за 10 лет для количества дней без осадков), что в целом соответствует закономерностям общего потепления. Наиболее интенсивные многолетние изменения характеристик отмечены в Западной и Центральной Сибири. Зависимость многолетних изменений характеристик толщины снежного покрова в наибольшей степени проявляется для максимальных экстремумов осадков (бета-коэффициенты составляют 10,91–64,71 при коэффициентах регрессии, равных 0,34–0,68) ввиду прямой связи изменений толщины снежного покрова и количества осадков при многолетнем увеличении температуры воздуха, но в области отрицательных значений. Анализ разностных интегральных кривых показал наличие двух понижений в многолетнем ходе характеристик (в 1985–1995 и 2005–2015 гг.), соответствующих понижениям в многолетнем ходе индексов арктической и североатлантической осцилляций. Для толщины снежного покрова определена недостаточная точность воспроизведения средних значений, экстремумов и коэффициентов линейного тренда реанализом ERA5-Land с отклонениями от коэффициентов данных наблюдений в 2–5 раз.

Ключевые слова: снежный покров; температура воздуха; осадки; средние значения; процентили; коэффициенты линейных трендов; корреляция; разностные интегральные кривые.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (тема FMWS-2024-0001 «Изменения климата, их причины и последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России», задание 1021051403088-5).

Образец цитирования:

Китаев ЛМ, Титкова ТБ, Алешина МА. Изменчивость характеристик экстремальности снежного покрова в условиях современного климата Сибири. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2025;1: 47–59.

EDN: UOCFFJ

For citation:

Kitaev LM, Titkova TB, Aleshina MA. Variability of snow cover extreme characteristics in the modern climate of Siberia. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2025;1:47–59. Russian.
EDN: UOCFFJ

Авторы:

Лев Михайлович Китаев – кандидат географических наук; старший научный сотрудник лаборатории климатологии.

Татьяна Борисовна Титкова – кандидат географических наук; старший научный сотрудник лаборатории климатологии.

Мария Александровна Алешина – кандидат географических наук; младший научный сотрудник лаборатории климатологии.

Authors:

Lev M. Kitaev, PhD (geography); senior researcher at the laboratory of climatology.

lkitaev@mail.ru

https://orcid.org/0000-0002-0618-9209

Tatiana B. Titkova, PhD (geography); senior researcher at the laboratory of climatology.

ttitkova@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0002-3232-083X

Maria A. Aleshina, PhD (geography); junior researcher at the laboratory of climatology.

alesina_maria@mail.ru

https://orcid.org/0000-0001-8416-7657



VARIABILITY OF SNOW COVER EXTREME CHARACTERISTICS IN THE MODERN CLIMATE OF SIBERIA

L. M. KITAEV^a, T. B. TITKOVA^a, M. A. ALESHINA^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29 Staromonetnyj Lane, 4 building, Moscow 119017, Russia*
Corresponding author: L. M. Kitaev (lkitaev@mail.ru)

Abstract. Long-term (up to seven months a year) occurrence of snow cover in the north of Eurasia determines the possibility of the influence of variability of the magnitude and frequency of manifestations of extremes of snow reserves on the speed and direction of climate and water balance changes. In this regard, an assessment of the long-term variability of average and extreme (percentiles 5 and 95 %) values of snow cover thickness in Siberia was carried out taking into account the features of the meteorological regime of the region in 1976–2022. Using observation data from meteorological stations, positive long-term trends in average values and extremes of snow cover thickness (more than 1.5 cm in 10 years) prevailing across the territory were identified against the background of an increase in average values and extremes of air temperature (from 0 to 2.5 °C in 10 years) and precipitation (more than 0.40 and 0.04 mm in 10 years for average values and maximum extremes, as well as 0.2–1.0 days in 10 years for the number of days without precipitation), which generally corresponds to the patterns of global warming. The most intense long-term changes in characteristics were noted in Western and Central Siberia. The dependence of long-term changes in snow cover thickness characteristics on the meteorological regime as a whole is most pronounced for maximum precipitation extremes (beta coefficients are 10.91–64.71 with regression coefficients equal to 0.34–0.68) due to the direct connection between changes in snow cover thickness and precipitation with a long-term increase in air temperature, but in the region of negative values. The analysis of the difference integral curves showed the presence of two decreases in the long-term course of the period characteristics (in 1985–1995 and 2005–2015), corresponding to decreases in the long-term course of the Arctic and North Atlantic oscillation indices. For the snow cover thickness, insufficient accuracy of reproduction of average values, extremes and linear trend coefficients by ERA5-Land reanalysis with deviations from observation data coefficients of 2–5 times was determined.

Keywords: snow cover; air temperature; precipitation; average values; percentiles; linear trend coefficients; correlation; difference integral curves.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the Programme of fundamental scientific research of state academies of sciences (topic FMWS-2024-0001 «Climate changes, their causes and consequences for the environment and life of the population in Russia», assignment 1021051403088-5).

Введение

Исследование частоты проявления экстремальных значений метеорологических характеристик является одной из важнейших задач в изучении современного климата. Количество и масштаб экстремальных явлений, таких как аномалии температуры воздуха и осадков, засухи и наводнения, могут усугублять последствия текущего потепления, выходя за рамки изменчивости средних значений климатических характеристик, что согласно оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) 2022 г. вызывает в настоящее время широкомасштабные неблагоприятные воздействия на природные процессы и хозяйственную деятельность [1]. Сложность проведения оценки значимости экстремальных явлений обусловливается неравномерностью хода потепления и связанных с ним процессов. Так, в начале XXI в. отмечен период замедления роста температуры воздуха в Северном полушарии при увеличении повторяемости аномально холодных зим на севере в связи с усилением влияния арктических циклонов, а период 2015–2020 гг. признан самым теплым за всю историю наблюдений в Евразии [1–4].

Снежный покров при общей тенденции к сокращению в Северном полушарии с 1950-х гг. тем не менее часто имеет разнонаправленные (в связи с особенностями климата) региональные временные тренды [4; 5]. На фоне потепления и увеличения количества осадков, происходящих в последние десятилетия, на западе и юге Восточно-Европейской равнины наблюдается многолетнее уменьшение снегозапасов [6; 7], тогда как на значительной территории северо-восточной части Восточно-Европейской равнины и севера Сибири отмечается увеличение снежности [8; 9], что соответствует региональным различиям в количестве жидких осадков зимнего периода.

Исследование экстремальных гидрометеорологических явлений проводится в первую очередь для оценки изменчивости температуры воздуха и осадков. Уже в конце 1990-х гг. в рамках работы МГЭИК

были даны рекомендации по унификации определения экстремумов с использованием индексов средних, максимальных и минимальных значений температуры воздуха для интервалов в процентах распределения [10], после чего методические подходы неоднократно уточнялись. Экстремальные явления, связанные с изменчивостью снежности, исследованы в меньшей степени. В частности, в отчетах МГЭИК и Росгидромета фиксируются годы и территории с аномально высокими и низкими снегозапасами относительно средних многолетних величин. Известны результаты параметризации экстремальных значений снежности в горах для оптимизации мероприятий по учету лавинной опасности [11]. Строительные нормы и правила регламентируют учет предельной величины снеговой нагрузки на инженерные конструкции¹. При этом масштаб и частота возникновения экстремальных снегозапасов на сегодня изучены недостаточно в связи с отсутствием детальных региональных оценок скорости и направленности их изменений. Цель настоящего исследования состоит в выявлении закономерностей пространственно-временного распределения экстремумов толщины снежного покрова на фоне изменчивости метеорологического режима Сибири.

Материалы и методы исследования

Первые предложения о необходимости координации исследований экстремумов климатических характеристик обсуждались в рамках МГЭИК. В частности, было предложено исследовать критические значения температуры воздуха в диапазонах 2; 5; 10; 90; 95 и 98 % распределения. В качестве пороговых значений также использовались значения 10 и 90 %. Так, для глобальной температуры было выявлено уменьшение экстремальных максимумов в конце XIX в., снижение экстремальных минимумов в первой половине XX в. и повышение экстремальных максимумов начиная с 1960-х гг. [10]. Анализ изменчивости сезонной температуры воздуха показал значимое многолетнее увеличение как средних значений, так и процентиелей 5 и 95 % в 1966–2000 гг. на севере Восточно-Европейской равнины. Суммарное сезонное количество осадков в это время имеет многолетнюю тенденцию к повышению на фоне увеличения сезонных значений процентиля 95 % [12]. В статье М. Ю. Бардина и Т. В. Платовой для температуры воздуха показан рост как минимальных, так и максимальных значений (процентиелей 5 и 95 %) на большей части территории России при наличии тем не менее регионов с отрицательными трендами [13].

В ходе проведения исследований для территории Сибири авторами настоящей работы были использованы результаты суточных наблюдений 198 метеорологических станций за толщиной снежного покрова в 1976–2022 гг. Исходные ряды данных имеют минимум пропусков и позволяют рассмотреть особенности снегонакопления с начала периода устойчивого многолетнего потепления. Исследована территория восточнее 60° в. д. и севернее 55° с. ш. Плотность и равномерность распределения метеорологических станций здесь нельзя считать идеальными, но тем не менее наблюдениями охвачены основные ландшафтные комплексы. Уточнение региональных особенностей изменчивости выполнено на примере данных наблюдений реперных метеорологических станций Западной Сибири (сектор 60–90° в. д.), Центральной Сибири (сектор 90–120° в. д.) и Восточной Сибири (сектор 120–180° в. д.). Список реперных станций приведен в табл. 1–3.

Оценка сезонных изменений характеристик проведена для условий с устойчивым снежным покровом (с января по март включительно), и, таким образом, пороговые экстремальные значения толщины снега определены как процентиeli 5 и 95 % для выборки в 90 сут холодного периода каждого года. Для выявления отклика особенностей снегонакопления на изменчивость метеорологического режима использованы суточные и осредненные за холодный период данные о температуре воздуха и осадках с учетом количества в сезоне дней с их наличием. В связи с дискретностью хода осадков как аналог экстремально малых значений здесь рассматривается количество случаев (дней) без осадков [13]. Для упрощения формулировок пороговые значения процентиля 5 % далее упоминаются как минимальные экстремумы, пороговые значения процентиля 95 % – как максимальные экстремумы, отсутствие осадков (их нулевые значения) приводится как количество дней без осадков. Актуальность применения данной методики состоит в возможности оценки многолетней динамики не только средних, но и экстремальных сезонных значений толщины снежного покрова, что позволяет уточнить их значимость для катастрофических природных событий.

Проведена оценка точности воспроизведения изменчивости средних значений и экстремумов толщины снежного покрова реанализом Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5-Land [14; 15]. Исходный материал представлен ежечасными данными с разрешением сетки 9 км ($0,1 \times 0,1^\circ$), осредненными в суточные значения с привязкой соответствующих ячеек к координатам реперных метеорологических станций.

¹СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. М. : ФГУП ЦПП, 2005. 44 с.

Результаты и их обсуждение

Тенденции многолетних изменений средних сезонных значений температуры воздуха в подавляющем большинстве положительны и значимы с коэффициентами линейного тренда в диапазоне от 0 до 2,5 °C за 10 лет (рис. 1, *a*). Тренды экстремумов имеют аналогичное распределение в пространстве при меньшем диапазоне – от 0,5 до 1,5 °C за 10 лет (рис. 1, *б* и *в*). Преобладают небольшие по величине положительные значимые тренды средних за сезон значений и максимальных экстремумов осадков – более 0,40 и 0,04 мм за 10 лет (рис. 2, *а* и *в*). Количество дней без осадков на большей части региона увеличивается со значимыми коэффициентами линейного тренда в диапазоне 0,2–1,0 дня за 10 лет (преимущественно в Западной Сибири и южной части Центральной Сибири) (рис. 2, *б*), что на фоне роста количества осадков является косвенным признаком усиления их интенсивности. Положительные значимые коэффициенты линейных трендов средних сезонных значений толщины снежного покрова (более 1,5 см за 10 лет) располагаются в основном в Центральной Сибири, в бассейне р. Оби. Тенденции изменений минимальных и максимальных сезонных экстремумов в целом невелики (более 0,2 и 0,4 см за 10 лет соответственно) и равномерно распределены по площади (рис. 1–3, табл. 1).

Таблица 1

Многолетняя изменчивость характеристик толщины снежного покрова
 по данным наблюдений реперных метеорологических станций и реанализа ERA5-Land

Table 1

Long-term variability of snow cover thickness characteristics
 based on data from reference meteorological stations and ERA5-Land reanalysis

Метеорологическая станция	Тип данных	Толщина снежного покрова, см			Коэффициенты линейных трендов, см за 10 лет		
		Среднее значение	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %	Среднее значение	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %
<i>Западная Сибирь</i>							
Игарка (67,47° с. ш., 86,57° в. д.)	Наблюдения	70	56	83	2,50	2,20	3,86
	Реанализ	89	72	105	-10,50	-10,92	-10,44
Толька (63,98° с. ш., 82,08° в. д.)	Наблюдения	71	58	82	0,99	0,66	1,40
	Реанализ	75	53	88	-3,15	-5,40	-2,77
Бакчар (57,00° с. ш., 82,07° в. д.)	Наблюдения	60	44	72	1,43	0,79	3,63
	Реанализ	52	13	70	0,83	-1,03	-2,73
<i>Центральная Сибирь</i>							
Оленёк (68,50° с. ш., 112,43° в. д.)	Наблюдения	37	31	46	0,49	0,93	0,33
	Реанализ	43	33	51	-4,66	-4,08	-4,60
Ербогачён (61,27° с. ш., 108,02° в. д.)	Наблюдения	47	33	54	2,92	2,55	3,17
	Реанализ	50	31	59	-1,58	-2,60	-1,60
Киренск (57,77° с. ш., 108,07° в. д.)	Наблюдения	41	33	47	2,19	1,64	2,67
	Реанализ	47	16	60	-8,11	-8,47	-8,85
<i>Восточная Сибирь</i>							
Чокурдах (70,62° с. ш., 147,88° в. д.)	Наблюдения	35	28	43	3,10	1,11	4,25
	Реанализ	48	37	57	1,17	-2,93	-1,30
Оймякон (63,25° с. ш., 143,15° в. д.)	Наблюдения	28	23	31	0,18	0,27	0,17
	Реанализ	31	23	36	-3,33	-3,09	-3,97
Талон (59,77° с. ш., 148,63° в. д.)	Наблюдения	76	61	93	3,70	3,34	4,33
	Реанализ	94	77	117	2,26	-0,85	-5,11

Примечание. Курсивом выделены незначимые коэффициенты линейных трендов (уровень 95 %).

Общей закономерностью изменчивости характеристик метеорологического режима и толщины снежного покрова является преобладающее на территории многолетнее увеличение как средних значений, так и экстремумов, хотя теоретически возможно присутствие трендов противоположных направлений. Многолетний рост толщины снежного покрова на фоне потепления связан с увеличением количества осадков при повышении температуры воздуха зимой в области отрицательных значений.

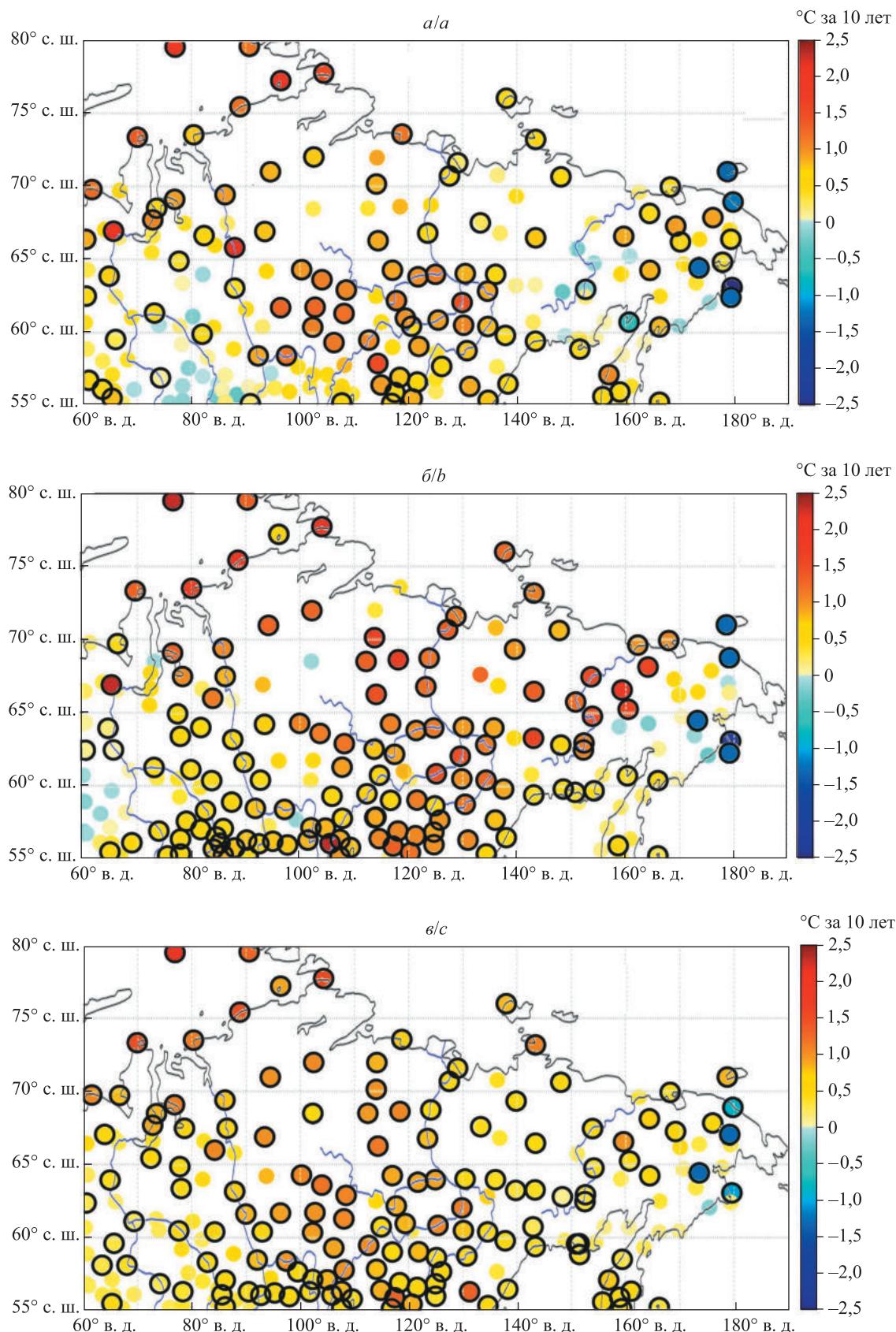
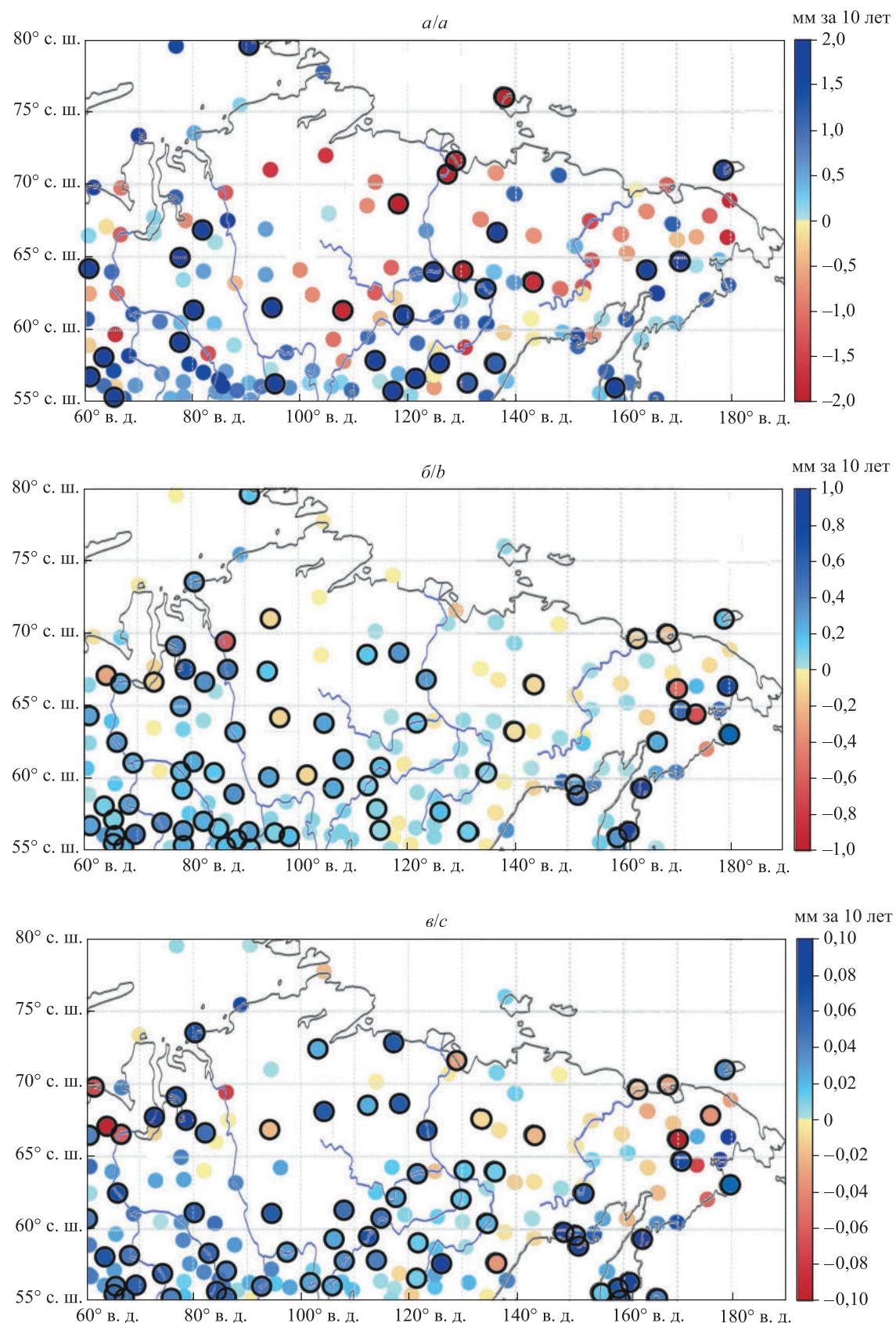


Рис. 1. Многолетние тренды температуры воздуха:
 a – среднее значение; b – процентиль 5 %; c – процентиль 95 %.
 Точки, имеющие контур, являются значимыми трендами

Fig. 1. Long-term temperature trends:
 a – average value; b – percentile 5 %; c – percentile 95 %.
 Dots with contour are significant trends



Rus. 2. Многолетние тренды осадков:
а – среднее значение; б – количество дней без осадков; в – процентиль 95 %.
 Точки, имеющие контур, являются значимыми трендами

Fig. 2. Long-term precipitation trends:
a – average value; b – number of days without precipitation; c – percentile 95 %.
 Dots with contour are significant trends

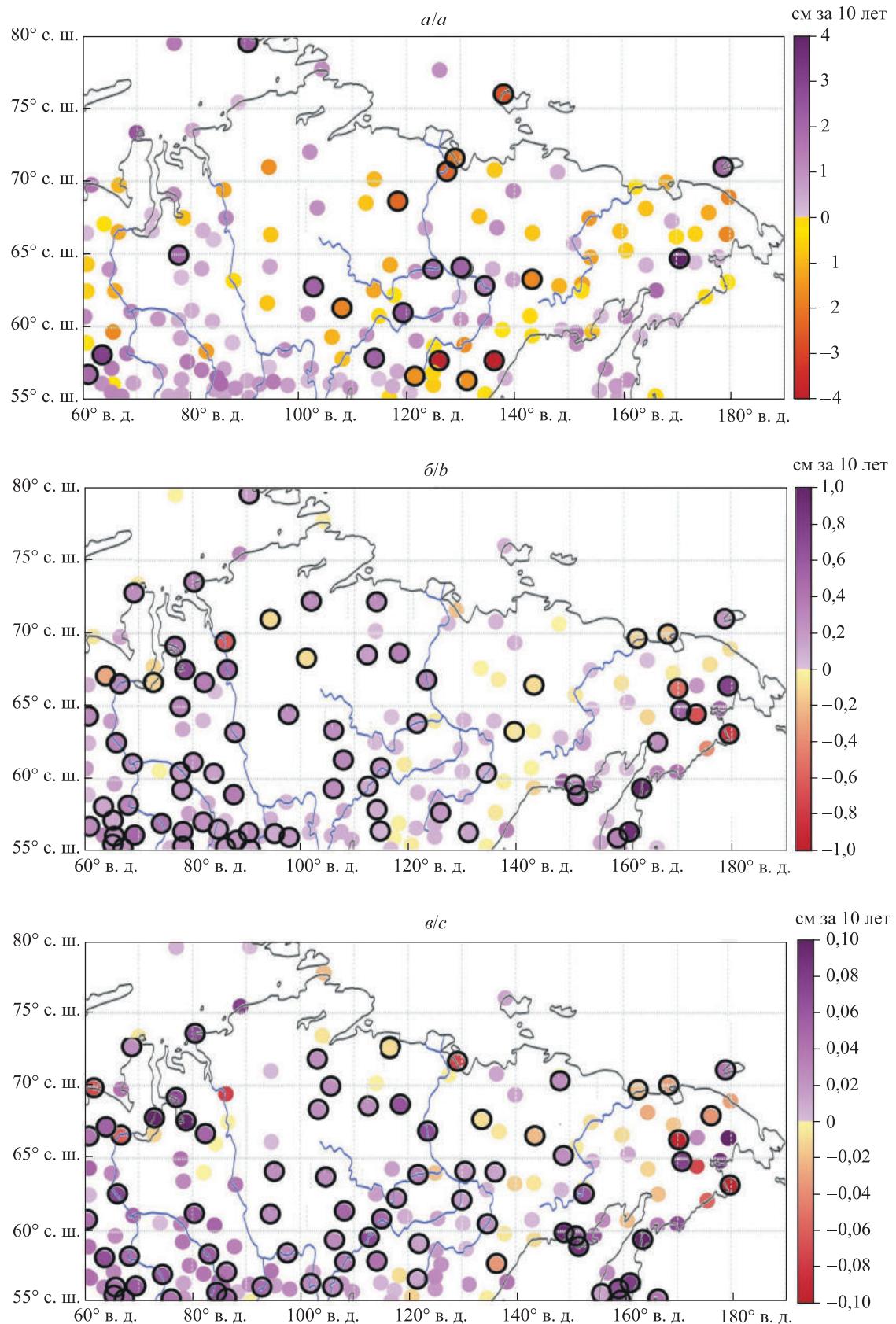


Рис. 3. Многолетние тренды толщины снежного покрова:
а – среднее значение; б – процентиль 5 %; в – процентиль 95 %.
Точки, имеющие контур, являются значимыми трендами

Fig. 3. Long-term snow cover thickness trends:
a – average value; b – percentile 5 %; c – percentile 95 %.
Dots with contour are significant trends

В табл. 2 приведены результаты анализа регрессионной зависимости характеристик толщины снежного покрова от температуры воздуха и осадков. Коэффициенты множественной регрессии для максимальных экстремумов (0,34–0,68) превышают коэффициенты множественной регрессии для минимальных экстремумов (0,13–0,42). Превышение значений максимальных экстремумов над значениями минимальных экстремумов характерно также для бета-коэффициентов, согласно которым преобладающий значимый вклад в многолетнюю динамику именно максимальных экстремумов вносят осадки.

Таблица 2
**Зависимость многолетнего хода экстремумов толщины снежного покрова
 от хода температуры воздуха и осадков**

Table 2
**Dependence of the long-term variation of snow cover thickness extremes
 on changes in air temperature and precipitation**

Метеорологическая станция	Коэффициент регрессии		Бета-коэффициенты			
			Температура воздуха		Осадки	
	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %
<i>Западная Сибирь</i>						
Игарка (67,47° с. ш., 86,57° в. д.)	0,15	0,41	0,29	0,70	4,96	17,52
Толька (63,98° с. ш., 82,08° в. д.)	0,41	0,62	1,37	4,30	1,04	29,21
Бакчар (57,00° с. ш., 82,07° в. д.)	0,19	0,38	0,98	0,63	0,97	23,05
<i>Центральная Сибирь</i>						
Оленёк (68,50° с. ш., 112,43° в. д.)	0,13	0,35	0,04	0,56	2,54	10,91
Ербогачён (61,27° с. ш., 108,02° в. д.)	0,42	0,59	0,61	0,79	12,91	25,48
Киренск (57,77° с. ш., 108,07° в. д.)	0,32	0,52	-0,37	-0,37	25,15	42,06
<i>Восточная Сибирь</i>						
Чокурдах (70,62° с. ш., 147,88° в. д.)	0,15	0,34	0,81	2,01	4,78	21,43
Оймякон (63,25° с. ш., 143,15° в. д.)	0,25	0,58	-0,55	-0,44	24,02	64,71
Талон (59,77° с. ш., 148,63° в. д.)	0,34	0,68	-1,87	-1,52	14,11	43,99

При мечани е. Курсивом выделены незначимые коэффициенты (уровень 95 %).

Как упоминалось ранее, для исследуемого периода (1976–2022) характерно устойчивое потепление при разной скорости повышения температуры воздуха. Так, в начале XX в. в Северном полушарии отмечено замедление роста температуры с последующим ускорением потепления и увеличением количества осадков [1–4; 16]. Для уточнения региональных особенностей многолетних изменений характеристик толщины снежного покрова и метеорологического режима приводятся результаты анализа их разностных интегральных кривых на примере данных наблюдений реперных метеорологических станций, расположенных в срединной части западного, центрального и восточного секторов Сибири (метеорологические станции Толька, Ербогачён и Оймякон). Дополнительно рассмотрены кривые индексов арктической и североатлантической осцилляций. Для построения кривых рассчитывались суммы отклонений модульных коэффициентов от единицы по формуле $\sum (K - 1)$, где $K = \frac{X_i}{X_{cp}}$ (Х_и – характеристика в *i*-й год наблюдений; Х_{cp} – среднеарифметическое значение ряда наблюдений), с последующим суммированием значений $\sum (K_i - 1)$ за каждый год ряда наблюдений. Для корректного сопоставления колебаний характеристик разных регионов исключалось влияние их временной изменчивости путем добавления коэффициента вариации (C_v) в знаменателе. Полученное расчетное значение откладывалось по вертикальной оси. В результате были выявлены особенности переломных точек, разделяющих квазиоднородные совокупности значений характеристик (рис. 4 и 5).

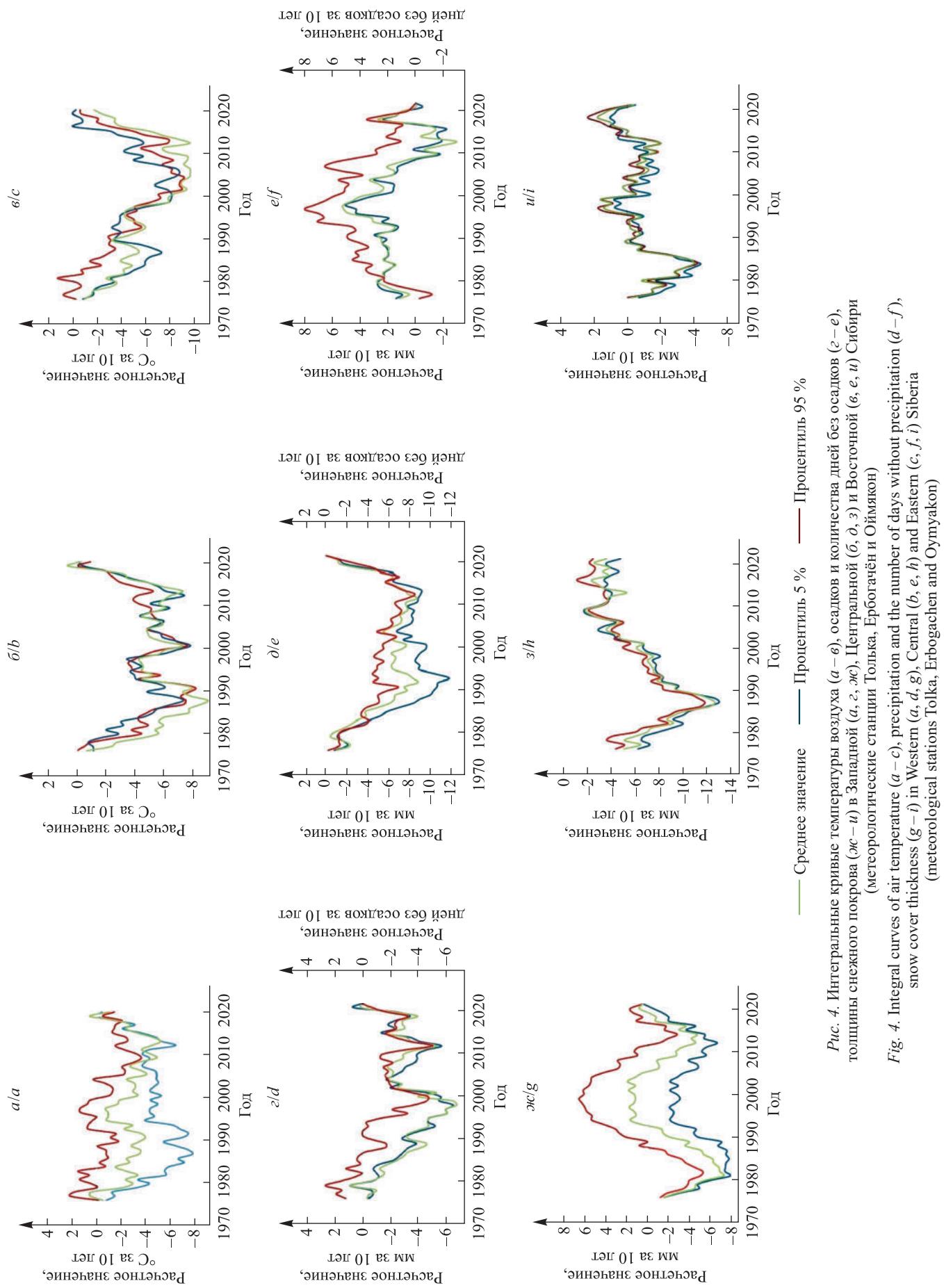


Рис. 4. Интегральные кривые температуры воздуха ($a - e$), осадков и количества дней без осадков ($e - e$), толщины снежного покрова ($e - i$) в Западной (a, c, e), Центральной (b, d, g) и Восточной (b, e, i) Сибири (метеорологические станции Толька, Ербогач и Оймякон)

Fig. 4. Integral curves of air temperature ($a - c$), precipitation and the number of days without precipitation ($d - f$), snow cover thickness ($g - i$) in Western (a, d, g), Central (b, e, h) and Eastern (c, f, i) Siberia (meteorological stations Tolkha, Erbogachen and Oymyakon)

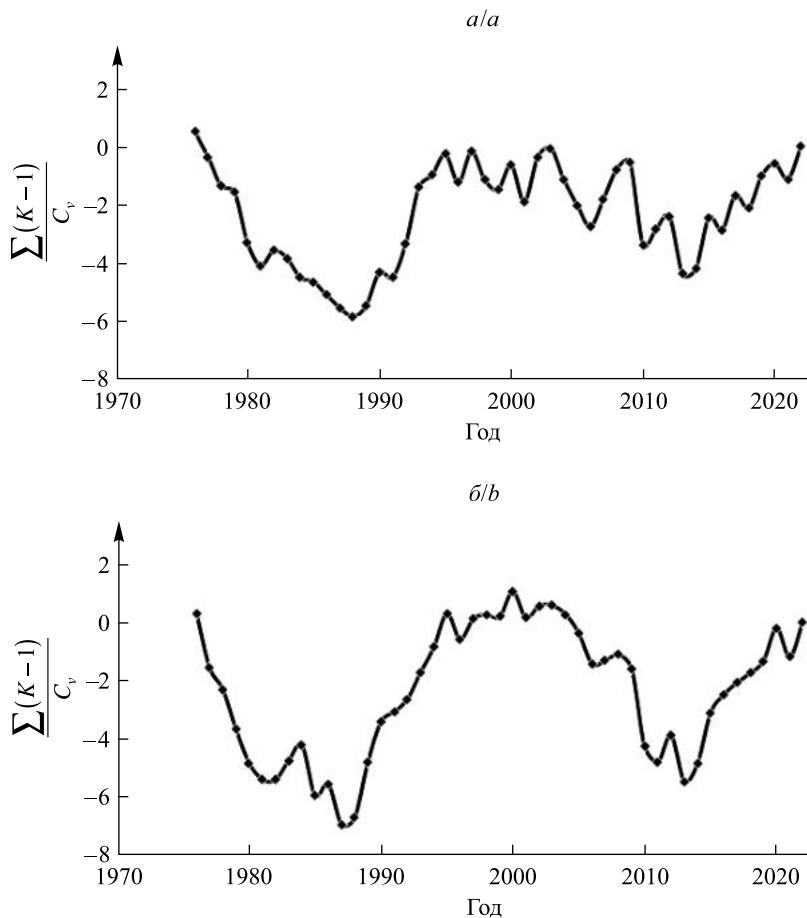


Рис. 5. Интегральные кривые индексов арктической (а) и североатлантической (б) осцилляций

Fig. 5. Integral curves of the Arctic (a) and North Atlantic (b) oscillation indices

Репрезентативность рядов наблюдений в данном случае определяется наличием положительной и отрицательной аномалий близкой продолжительности по времени. Особенностью интегральных кривых является зависимость точности оценок от среднего значения и коэффициента вариации конкретного ряда и, соответственно, отсутствие возможности сравнения рядов разной продолжительности, однако сравнительный анализ рядов равной длины вполне приемлем.

Многолетний ход характеристик имеет понижения в 1985–1995 и 2005–2015 гг. синхронно для средних значений и экстремумов. Выявленная изменчивость повторяет вид разностных интегральных кривых многолетнего хода индексов арктической и североатлантической осцилляций (использованы суточные данные (<https://sl.noaa.gov/data/climateindices/>) Центра прогнозирования климата Национальной метеорологической службы США (*Climate Prediction Center, National Weather Service*)): согласно общим закономерностям положительные фазы осцилляций связаны с теплыми и влажными условиями зимнего периода в северной части Евразии, а отрицательные фазы обусловлены холодными и относительно сухими условиями климата [16–18].

Сравнительный анализ показал повсеместное превышение данных реанализа ERA5-Land над данными наблюдений в значительном диапазоне ошибок – от 8 до 27 % для средних значений, от 7 до 53 % для минимальных экстремумов и от 7 до 33 % для максимальных экстремумов. Корреляция межгодовой динамики средних значений и экстремумов толщины снежного покрова по данным реанализа и данным наблюдений высока: соответствующие коэффициенты составляют не менее 0,58 при коэффициентах корреляции стандартных отклонений менее 0,53 (табл. 3). При этом коэффициенты линейных трендов средних значений и экстремумов для данных реанализа существенно (в 2–5 раз) превышают аналогичные коэффициенты для данных наблюдений, имея разницу в знаке (см. табл. 3). По-видимому, при модельных расчетах прогноза учитывается продолжающееся потепление, хотя для севера Сибири предполагается также увеличение количества осадков, что на фоне отрицательных зимних температур делает возможным увеличение снегозапасов. Подобное несоответствие результатов наблюдений и расчетов выявлено А. Д. Крючковым и Н. А. Калининым: ошибки значений реанализа находятся в диапазоне 12–29 % для

западной и 40–65 % для восточной частей Пермского края [19]. Исследования Д. В. Туркова, В. С. Сократова и Т. Б. Титковой показали завышение водного эквивалента снега в феврале на территории Западной Сибири данными реанализа на 10–15 % на севере и в центре и более чем на 30 % на юге региона. В качестве возможной причины несоответствия выдвигается предположение о значительных ошибках при определении в ходе расчетов интегрального влагосодержания атмосферы [20].

Таблица 3

**Корреляционная связь многолетней динамики данных наблюдений
и реанализа ERA5-Land для толщины снежного покрова**

Table 3

**Correlation between the long-term variability of observational
and ERA5-Land reanalysis data for snow cover thickness**

Метеорологическая станция	Коэффициенты корреляции		
	Среднее значение	Процентиль 5 %	Процентиль 95 %
<i>Западная Сибирь</i>			
Игарка (67,47° с. ш., 86,57° в. д.)	0,74	0,75	0,81
Толька (63,98° с. ш., 82,08° в. д.)	0,70	0,65	0,55
Бакчар (57,00° с. ш., 82,07° в. д.)	0,71	0,25	0,74
<i>Центральная Сибирь</i>			
Оленёк (68,50° с. ш., 112,43° в. д.)	0,81	0,81	0,72
Ербогачён (61,27° с. ш., 108,02° в. д.)	0,52	0,20	0,58
Киренск (57,77° с. ш., 108,07° в. д.)	0,76	0,14	0,24
<i>Восточная Сибирь</i>			
Чокурдах (70,62° с. ш., 147,88° в. д.)	0,82	0,75	0,74
Оймякон (63,25° с. ш., 143,15° в. д.)	0,77	0,69	0,74
Талон (59,77° с. ш., 148,63° в. д.)	0,73	0,65	0,73

Заключение

В целом новизна полученных результатов связана с детализацией пространственно-временных изменений и особенностей реакции на изменчивость метеорологического режима не только средних, но и экстремальных значений толщины снега в условиях Сибири. Основные положения сделанных выводов приведены ниже.

1. Для периода потепления, включая последние десятилетия, оценена количественная значимость пространственно-временных изменений толщины снежного покрова на фоне изменений температуры воздуха и количества осадков для средних значений и экстремумов (процентили 5 и 95 %, количество дней без осадков вместо процентиля 5 %). Выявлено преобладающее на территории значимое многолетнее увеличение средних и экстремальных значений: более 1,5 см за 10 лет для толщины снега, от 0 до 2,5 °C за 10 лет для температуры воздуха, более 0,04 мм за 10 лет для осадков и 0,2–1,0 дня за 10 лет для количества дней без осадков. Увеличение толщины снега на фоне потепления обусловлено повышением зимних температур в области отрицательных значений при увеличении количества осадков. Значимые коэффициенты линейного тренда в большей степени характерны для температуры воздуха с преобладанием на севере Сибири (до 2,5 °C за 10 лет); минимальные значения отмечены в основном

на юге Западной Сибири (не более 1,0 °С за 10 лет). Для осадков интенсивный рост отмечен на юге региона (до 1,5 и до 0,008 мм за 10 лет для средних значений и максимальных экстремумов соответственно, а также до 0,8 дня за 10 лет для количества дней без осадков).

Общий прирост сезонных минимальных и максимальных экстремумов за период исследований ограничивается первыми двумя десятками процентов от средних многолетних величин: 12,8 и 13,6 % для температуры воздуха, 9,8 и 16,2 % для толщины снежного покрова, 10,4 и 12,6 % для количества дней без осадков и их максимального экстремума. Таким образом, на основе анализа изменчивости характеристик в исследуемый период можно предположить отсутствие вероятности возникновения катастрофических явлений и резких изменений в многолетних тенденциях.

2. Согласно коэффициентам множественной регрессии (0,34–0,68) многолетний ход температуры воздуха и осадков в целом определяет изменения максимальных экстремумов толщины снежного покрова; исходя из значений бета-коэффициентов (10,91–64,71), превалирующий вклад вносят осадки.

3. Для реперных метеорологических станций выявлены существенные неточности как средних, так и экстремальных значений в данных реанализа ERA5-Land относительно данных наблюдений, особенно за толщиной снежного покрова (коэффициенты линейного тренда толщины снежного покрова отличаются в 2–5 раз), что, в частности, ограничивает возможности использования восстановленных данных для определения многолетних тенденций.

4. В дополнение к анализу трендов с использованием разностных интегральных кривых выявлены особенности многолетних тенденций изменения характеристик. Во всех случаях отмечены понижения кривых в 1985–1995 и 2005–2015 гг., которые соответствуют понижениям разностных интегральных кривых индексов атлантической и североатлантической осцилляций. Согласно особенностям циркуляционных атмосферных процессов смена положительных и отрицательных фаз осцилляций определяет для Евразии смену теплых и влажных условий климата на прохладные и сухие условия.

Библиографические ссылки

1. Pörtner H-O, Roberts DC, Tignor MMB, Poloczanska E, Mintenbeck K, Alegría A, et al., editors. *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2023. XII, 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
2. Соломон С, Чин Д, Мэннинг М, редакторы. *Изменение климата, 2007 г.: физическая научная основа. Вклад рабочей группы I в четвертый доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата об оценках. Резюме для политиков, техническое резюме и часто задаваемые вопросы*. Кембридж: Издательство Кембриджского университета; 2007. VIII, 163 с.
3. Semenov VA, Latif M, Dommenget D, Keenlyside NS, Strehz A, Martin T, et al. The impact of North Atlantic – Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature. *Journal of Climate*. 2010;23(21):5668–5677. DOI: 10.1175/2010JCLI3347.1.
4. Попова ВВ, Морозова ПА, Титкова ТБ, Семенов ВА, Черенкова ЕА, Ширяева АВ и др. Региональные особенности современных изменений зимней аккумуляции снега на севере Евразии по данным наблюдений, реанализа и спутниковых измерений. *Лед и снег*. 2015;55(4):54–62. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-4-73-86.
5. Акентьева ЕМ, Анисимов ОА, Бардин МЮ, Журавлев СА, Катцов ВМ, Киселев АА и др. *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме*. Киселев АА, Махоткина ЕЛ, Павлова ТВ, редакторы. Санкт-Петербург: Наукомеханик технологии; 2022. 124 с.
6. Кислов АВ, Китаев ЛМ, Евстигнеев ВМ. Изменение снежного покрова при прогнозируемом потеплении климата в XXI в. (на примере Восточно-Европейской равнины). *Вестник Московского университета. Серия 5, География*. 2009;5:35–42. EDN: KZAPN.
7. Brown RD, Derksen C. Is Eurasian October snow cover extent increasing? *Environmental Research Letters*. 2013;8(2):024006. DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024006.
8. Ghatak D, Deser C, Frei A, Gong G, Phillips A, Robinson DA, et al. Simulated Siberian snow cover response to observed Arctic sea ice loss, 1979–2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012;117(D23):D23108. DOI: 10.1029/2012JD018047.
9. Khan V, Holko L, Rubinstein K, Breiling M. Snow cover characteristics over the main Russian river basins as represented by reanalyses and measured data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2008;47(6):1819–1833. DOI: 10.1175/2007JAMC1626.1.
10. Folland CK, Miller C, Bader D, Crowe M, Jones P, Plummer N, et al. Workshop on indices and indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3–6 June 1997. Breakout group C: temperature indices for climate extremes. *Climatic Change*. 1999;42(1):31–43. DOI: 10.1023/A:1005447712757.
11. Олейников АД, Володичева НА. Современные тенденции изменения снеголавинного режима Центрального Кавказа (на примере Приэльбрусья). *Лед и снег*. 2019;59(2):191–200. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-400.
12. Китаев ЛМ, Данилович ИС, Акентьева ЕМ. Особенности региональной неоднородности средних и экстремальных метеорологических характеристик северо-запада Восточно-Европейской равнины. В: Янцер ОВ, Юровских АМ, Братанов НС, редакторы. *Изменения климата и погодные аномалии: механизмы и эффективность фенологических гомеостатических реакций. Материалы Всероссийской научно-практической конференции; 7–10 сентября 2022 г.; Екатеринбург, Россия*. Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет; 2022. с. 53–63.
13. Бардин МЮ, Платова ТВ. Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2013;25:71–93. EDN: VHTFMF.

14. Brun E, Vionnet V, Boone A, Decharme B, Peings Ya, Valette R, et al. Simulation of northern Eurasian local snow depth, mass, and density using a detailed snowpack model and meteorological reanalyses. *Journal of Hydrometeorology*. 2013;14(1):203–219. DOI: 10.1175/JHM-D-12-012.1.
15. Climate Data Store [Internet]. [S. l.]: Copernicus Climate Change Service; 2019. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present; 2019 June 23 [cited 2021 December 30]. Available from: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>. DOI: 10.24381/cds.68d2bb30.
16. Попова ВВ. Современные тренды осадков и атмосферной циркуляции в речных бассейнах европейской части России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2023;87(1):60–76. DOI: 10.31857/S2587556623010144.
17. Чижова ЮН. Влияние арктических воздушных масс на климатические условия периода снегонакопления в центре ЕТР. *Арктика и Антарктика*. 2021;1:16–25. DOI: 10.7256/2453-8922.2021.1.35112.
18. Hurrell JW. Decadal trends in the North Atlantic oscillation: regional temperature and precipitation. *Science*. 1995;269(5224): 676–679. DOI: 10.1126/science.269.5224.676.
19. Крючков АД, Калинин НА. Сравнение характеристик снежного покрова по данным метеорологических станций и реанализа ERA5-Land на территории Пермского края. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2021;2:95–110. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-95-110.
20. Турков ДВ, Сократов ВС, Титкова ТБ. Определение снегозапасов Западной Сибири по расчетам на модели локального тепловлагообмена SPONSOR с использованием данных реанализа. *Лед и снег*. 2017;57(3):343–354. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-343-354.

Получена 07.11.2024 / исправлена 03.03.2025 / принята 06.03.2025.
Received 07.11.2024 / revised 03.03.2025 / accepted 06.03.2025.