

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАНАЛИЗА ERA5–LAND И ДАННЫХ МЕТЕОСТАНЦИЙ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ РОССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ СИСТЕМ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

© 2023 г. Т. Б. Титкова^{1,*}, М. Д. Ананичева¹

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: titkova@igras.ru

Поступила в редакцию 25.11.2022 г.

После доработки 08.02.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Исследуется возможность совместного использования реанализа ERA5–Land и станционных данных для оценки высоты границы питания ледниковых систем. ERA5–Land хорошо воспроизводит температуру и удовлетворительно тренды осадков. Положительные температурные тренды разной интенсивности наблюдаются во всех горных районах. Наблюдаемое увеличение высоты границы питания ледников совпадает с областями высоких температурных трендов.

Ключевые слова: горные районы, высота границы питания, ERA5–Land, тренды температуры, тренды осадков

DOI: 10.31857/S2076673423020163, **EDN:** RVITYH

ВВЕДЕНИЕ

Ледниковые системы горных районов России – одни из наиболее чувствительных индикаторов современного глобального потепления последних десятилетий. Изменение главных климатических характеристик температуры и осадков приводит к уменьшению продолжительности залегания снежного покрова в Средней Сибири и увеличению на Дальнем Востоке и Чукотке (Титкова, Виноградова, 2017). При этом изменение климата в горных районах России имеет свои региональные особенности. Высокогорные хребты и массивы препятствуют движению воздушных масс, что может нарушать общие для данного региона климатические тенденции глобальных процессов. Таким образом, климатические тренды в горных районах могут неоднозначно влиять на массообмен оледенения и иметь региональные различия.

Современные гляциологические исследования изменений режима ледниковых систем показывают, что почти все ледники в горных районах отступили за последние несколько десятилетий. Темпы деградации составляют в среднем 1–2% массы в год (Haeberli, Zemp, 2009; Special Report..., 2019). По оценкам (Khromova et al., 2019) сокращение ледников за вторую половину XX века в России колеблется от 10.6 (Камчатка) до 69% (Корякское нагорье). Края ледников гор Сунтар-

Хаята с 1945 по 2013 г. отступили на 500–650 м, а нижняя граница области питания повысилась на 61 ± 38 м при сокращении поверхностной скорости движения ледников в 5–6 раз по сравнению с оценками 1957–1959 гг. (Галанин и др., 2013). Отмечается, что площадь ледников на массиве Буордах в хребте Черского сократилась примерно на 17% с момента последнего максимума (около 1550–1850 гг.) (Gurney et al., 2008). На Камчатке во второй половине XX – начале XXI в. площадь ледников Срединного хребта уменьшилась на 16.6%, площадь ледников Кроноцкого полуострова сократилась на 22.9%, а массива Алней-Чашаконджа – на 19.2% (Муравь'в, Носенко, 2013; Муравь'в, 2014). Все результаты исследований показывают, что повышение летней температуры воздуха и изменение зимних осадков определяют общую тенденцию сокращения размеров ледников в горных районах России. Различия в скорости и направлении изменений ледников зависят от местных орографических и климатических особенностей.

В начале 1980-х годов А.Н. Кренке с помощью гляциоклиматического подхода сделал успешную попытку решить проблему целостной характеристики массообмена оледенения ледниковых систем на территории СССР (Кренке, 1982). Он широко использовал такие гляциологические характеристики, как высота границы питания и её

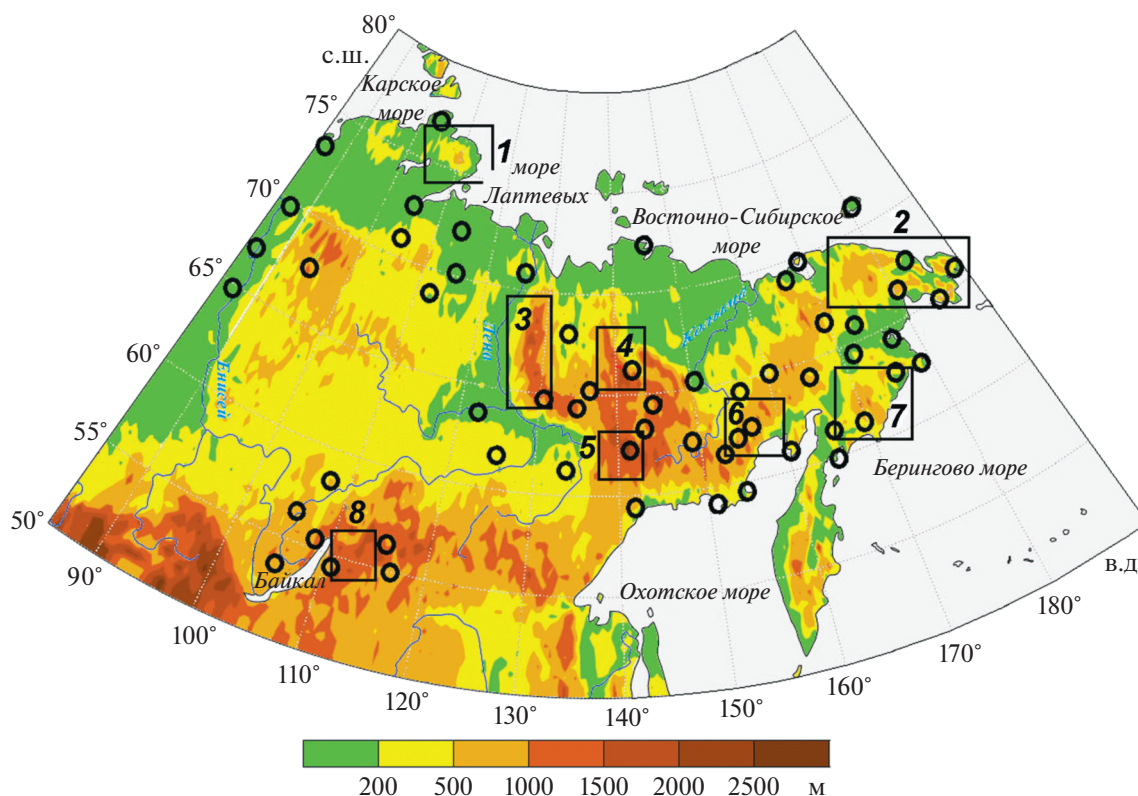


Рис. 1. Район исследования: 1 – горы Бырранга (Таймыр); 2 – Чукотское нагорье; 3 – Верхоянский хребет; 4 – хребет Черского; 5 – горы Сунтар-Хаята; 6 – Колымское нагорье; 7 – Корякское нагорье; 8 – Байкальский регион. Кружками показаны метеостанции, использованные в расчетах.

Fig. 1. Research area: 1 – Byrranga Mountains (Taymyr); 2 – Chukotka Mountains; 3 – Verkhoyansk Range; 4 – Chersky Range; 5 – Suntar-Khayata Mountains; 6 – Kolyma Mountains; 7 – Koryak Mountains; 8 – Baikal Region. Weather stations used in estimations are shown as circles.

пространственное распределение. Опора метода – ледниковые системы, а не один индивидуальный ледник. Это позволяет абстрагироваться от некоторых локальных особенностей ледников как целых единиц. Ледниковые системы – это определённое множество ледников, объединённое общими связями с окружающей средой и внутренними взаимосвязями, характеризующееся общими свойствами, суммарными и не сводимыми к сумме свойств отдельных компонентов системы.

Работа по изучению изменения высоты границы питания (далее – ВГП) ледниковых систем служит продолжением исследования полей гляциологических характеристик, начатого с публикации 2005 г. (Ананичева, Кренке, 2005; Kononov et al., 2005; Ананичева, 2018).

Цель исследования – оценка возможности применения климатических архивов нового поколения реанализа (в данном случае ERA5–Land) совместно со стационарными данными по температуре и осадкам с целью оценки зависимости от климата такой гляциологической характеристики, как ВГП ледниковых систем в труднодоступ-

ных и недостаточно изученных районах азиатской части России.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты. Выделены следующие горные районы: горы Бырранга (Таймыр), Чукотское нагорье, хребты Верхоянский и Черского, горы Сунтар-Хаята, Корякское нагорье, Колымское нагорье, Байкальский регион (рис. 1). Все эти горные страны недостаточно изучены с точки зрения и климата, и оледенения. Одним из авторов данной статьи изучались эти ледниковые системы в работах (Yamada et al., 2002; Ананичева, Кренке, 2008; Ананичева, 2018; Ананичева и др., 2019 и др.).

Материалы. Значения температуры воздуха и осадков определяли в узлах сетки 0.1×0.1 с 1966 по 2021 г. с месячным разрешением по данным реанализа ERA5–Land, который является пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений, созданным Европейским центром среднесрочных прогнозов (ECMWF). Применение данных ERA5 обусловлено рядом достоинств:

непрерывными рядами данных, высоким пространственным разрешением (0.1×0.1) с исходным разрешением 9 км (Copernicus...), а также высокой точностью описания температурного режима. Набор данных ERA5–Land представляет собой синтез моделирования и данных наблюдений и имеет некоторую степень неопределенности. Ошибка оценок моделей растёт по мере удалённости в прошлое из-за количества доступных наблюдений. По оценкам (Muñoz-Sabater et al., 2021) реанализ ERA5–Land имеет общую 4%-ную ошибку в данных береговой линии из-за вклада в расчёт прибрежных точек, где важно пространственное разрешение. Реанализ ERA5 лучше, чем другие (JRA55, NCEP2, CRU), показывает соответствие данным наблюдений для всех сезонных и годовых значений. Точность воспроизведения колебаний температуры в Восточной Азии составляет 95.5%, а осадков с $R > 0.8$ (24.8% территории) и $0.6 < R < 0.8$ (64.2%) (Kim, Lee 2022).

Для верификации данных реанализа в исследуемых районах использованы показатели температуры и осадков, полученные из архива ФГБУ “ВНИИГМИ МЦД” (Булыгина и др.) Выбрана 61 метеостанция с непрерывными рядами данных (см. рис. 1) В табл. 1 приведён итоговый список станций, сгруппированных по районам исследования.

Методы. 1. Для обоснования использования данных реанализа ERA5–Land проведена верификация среднемесячной температуры на высоте 2 м и месячных сумм осадков реанализа ERA5–Land со станционными данными в горных районах азиатской территории России по сезонам за период 1966–2021 гг. Оценена относительная погрешность реанализа, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины, выраженному в процентах. Для этого в координатах метеорологической станции из поля реанализа ERA5–Land были выбраны значения параметра за тот же период. Расчёт относительной ошибки производился по формуле:

$$\delta = (X_r - X_c) / X_c \times 100\%,$$

где X_r – значение реанализа ERA5–Land, а X_c – значение по станционным данным.

Оценена относительная погрешность значений параметров реанализа ERA5–Land в координатах метеостанций. Для результирующих таблиц оценок точности реанализа были рассчитаны: средние ошибки для выделенных районов по группе метеостанций данного района (см. табл. 1); линейная корреляция данных метеостанций с данными реанализа ERA5–Land в координатах станций за период 1966–2021 гг. ежемесячно; среднесезонные значения корреляции. В дополнение рассмотрена относительная ошибка линейных

трендов температуры и осадков за 1966–2021 гг. реанализа ERA5–Land в ключевых точках. Расчёт относительной ошибки выполнен аналогично схеме, описанной выше. Линейные тренды определялись по уравнениям регрессии с оценкой статистической значимости 95% по критерию Стьюдента. Из-за ограничения количества метеостанций и их неравномерности визуализация полей относительной ошибки значений параметров, их трендов и коэффициентов корреляции была произведена с разрешением $5^\circ \times 5^\circ$.

2. Чтобы оценить климатические изменения, происходящие в исследуемых горных системах на фоне общих изменений с учетом рельефа местности, построены карты трендов температуры за год, летний период и осадков за год и холодный период (октябрь–апрель) по данным реанализа ERA5–Land за период 1966–2021 гг. Линейные тренды определялись по уравнениям регрессии рядов этих параметров с принятыми интервалами ошибок $\pm 0.1^\circ\text{C}$ для температуры и ± 5 мм для осадков. В данной работе под “трендом” понимается скорость изменения температуры и осадков за 55 лет.

3. При помощи данных температуры и осадков ERA5–Land была предпринята попытка оценить ВГП ледниковых систем, используя построенные профили абляции и аккумуляции для выделенных районов. Районы выделялись по сходству высотных профилей летних температур воздуха и твёрдых осадков по данным метеостанций для нижних частей профилей и реанализа – для верхних.

Для расчёта высотных профилей абляции и аккумуляции по климатическим данным (станции и реанализ) указанные выше районы были разбиты на 19 подрайонов: Верхоянский хребет (южная часть), хребет Черского (центральная часть), хребет Черского (юго-запад), хребет Черского (юго-восток), хребет Черского (южная часть), горы Сунтар-Хаята (северный массив), горы Сунтар-Хаята (южный массив), хребет Орулган, горы Бырранга (Таймыр), Колымское нагорье, район Пенжинской губы, Колымское нагорье, район Гижигинской губы, Корякское нагорье (северная часть), Корякское нагорье (южная часть), Чукотское нагорье (северная часть), Чукотское нагорье (южная часть), Байкальский регион (север) и Байкальский регион (восточная часть). Пересечение этих профилей определяет значения ВГП ледников, как в случае реального существования ледников в настоящее время, так и в случае их отсутствия в силу фактора недостаточной высоты для климатических условий формирования ледников. Таким образом, получено значение ВГП частично условное, включающее значения высоты границы питания как реальных, так и “потенциальных” групп оледенения.

Таблица 1. Список метеостанций, использованных для верификации данных реанализа ERA5–Land по районам исследования

Станция	Широта, °	Долгота, °	Высота, м	Станция	Широта, °	Долгота, °	Высота, м
<i>Верхоянский хребет</i>				<i>Корякское нагорье</i>			
Кюсюр	70.7	127.4	40	Марково	64.7	170.4	33
Вилуйск	63.8	121.6	123	Каменское	62.4	166.1	8
Томпо	64	135.9	400	Хатырка	62	175.2	13
Чурапча	62	132.6	179	Корф	60.4	166	1
Тонгулах	61.9	124.6	205	Апука	60.4	169.6	5
Охотский перевоз	61.9	135.5	141	Верхнее Пенжино	64.2	164.2	326
Сегян-Кюёль	64	130.3	208	Беринговская	63	179.3	1
<i>хребет Черского и горы Сунтар-Хаята</i>				<i>горы Бырранга</i>			
Оймякон	63.3	143.2	726	Мыс Челюскин	77.7	104.3	15
Сусуман	62.8	148.2	649	Остров Диксон	73.5	80.3	47
Зырянка	65.7	150.9	43	Саскылах	72	114.1	19
Охотск	59.4	143.2	6	Джалинда	70.1	114	62
Чокурдах	70.6	147.9	53	Оленек	68.5	112.4	127
Сеймчан	62.9	152.4	207	Хатанга	72	102.5	32
Бухта Нагаева	59.5	150.7	116	<i>Чукотское нагорье</i>			
Верхоянск	67.6	133.4	136	Остров Врангеля	70.98	178.5	2
Агаякан	63.1	141.9	777	О-в Айон	69.9	168	13
Среднекан	62.5	152.3	260	Мыс Шмидта	68.9	–179.4	7
Иэма	65.3	135.8	675	Островное	68.1	164.2	94
Коркодон	64.7	153.9	99	Илирней	67.25	169	326
Омолон	65.2	160.5	260	Эмультеем	66.4	173.3	74
Усть-Мома	66.5	143.2	196	Эгвекино	66.3	–179.1	15
Усть-Нера	64.5	143.1	519	Анадырь	64.8	177.6	94
<i>Колымское нагорье</i>				Провидения	64.4	–173.2	11
Тайгонос	60.7	160.4	33	Уэлен	66.2	169.8	6
Ямск-Брохово	59.3	154	5	<i>Байкальский регион</i>			
Омсугчан	62.5	155.8	521	Киренск	57.8	108.1	258
Лабазная	63.3	158.5	709	Орлинда	56.1	105.8	338
<i>плато Путорана</i>				Чара	56.9	118.4	711
Волочанка	71	94.5	37	Нижнеангарск	55.8	109.6	475
Дудинка	69.4	86.2	28	Калакан	55.1	116.8	613
Игарка	67.5	86.6	30	Жигалово	54.8	105.2	426
Агата	66.9	93.5	263	Баргуз заповедник	54.3	109.5	468
Туруханск	65.8	88	32				

Абляция для гор Сунтар-Хаята, хребтов Черского, Орулган и Корякского нагорья рассчитывалась по формуле М.М. Корейши, учитывающей характерную черту ледников северо-востока России – образование наложенного льда, который повторно тает осенью; формула выведена по наблюдениям ледников в горах Сунтар-Хаята:

$$A = 0.1(T_{\text{sum}} + 7)^3 \text{ (г/см}^2\text{)}$$

При расчётах был принят во внимание скачок температуры при переходе на ледниковую поверхность, определённый по формуле Н.В. Давидович:

$$T_{\text{gl}} = 0.85T_{\text{nongl}} - 1.2,$$

где T_{gl} , T_{nongl} – значения температуры на ледниковой и неледниковой поверхностях соответственно. Аккумуляцию определяли введением коэф-

Таблица 2. Относительная ошибка (%) реанализа ERA5–Land по температуре и осадкам в сравнении со станционными данными в горных районах азиатской части России по сезонам в период 1966–2021 гг.

Район	Температура (T) / Осадки (Pr)				
	год	зима	весна	лето	осень
Хребет Орулган (Верхоянский)	–12/49	–7/20	–10/82	–2/57	–5/37
Хребет Сунтар-Хаята и Черский	–14/52	–8/15	–15/90	–2/60	–5/42
Горы Северного Байкала	–13/74	–5/63	–14/122	0/38	–8/71
Колымское нагорье	–10/69	8/52	–14/98	–3/61	–5/65
Корякское нагорье	–3/65	9/68	–3/80	–2/53	7/59
Горы Бырранга (Таймыр)	–6/59	1/41	2/83	–2/59	–1/53
Чукотское нагорье	–3/59	8/47	–10/80	3/54	12/56

коэффициента концентрации снега ($K_{\text{сн}}$) к значениям твёрдых осадков, который зависит от преобладающего типа ледников в группе. Подробно методика была описана в работах (Ananicheva et al., 2010, 2020) и дополнялась в других статьях. Для остальных районов абляция рассчитывалась по формуле Кренке–Ходакова:

$$A = 1.33(9.66 + T_{\text{sum}})^{2.85},$$

где A – абляция в мм, T_{sum} – приледная температура воздуха летом.

В работе (Ананичева, Кренке, 2005) рассчитаны аналогичные профили для периода 1931–1960 гг. и получены значения ВГП для ледниковых систем гор Сунтар-Хаята, хребтов Черского и Орулган, поэтому мы сравнили наши значения ВГП за 1966–2021 гг. со значениями до 1931–1960 гг. и получили подъём ВГП за прошедший с тех пор период времени. Для остальных районов подъём ВГП подсчитывался в сравнении с соответствующими средними значениями фирновой линии, приведенными в каталогах, в основном это величины начала 1960-х годов, поэтому сравнение достаточно корректно. Точек для построения детального поля ВГП мало, поэтому пространственная картина представлена в разделе “Результаты” и имеет самый общий характер (нижние точки высотных зависимостей T_{sum} брались из данных ближайших метеостанций, а для расчета высотных значений использовались данные реанализа ERA5–Land).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка относительной погрешности реанализа ERA5–Land. Колебание относительной ошибки значений температуры воздуха и осадков реанализа ERA5–Land по сезонам и в целом за год по исследуемым районам представлено на рис. 2, а–б и в табл. 2. Максимальные ошибки среднегодовой температуры (–12%) сосредоточены во внутренних горных районах и захватывают Верхоянский

хребет, хребет Черского и горы Сунтар-Хаята (см. рис. 2, а). В среднем за год реанализ занижает значения температуры в горных районах за счёт весенних и осенних значений. Максимальная относительная ошибка наблюдается в весенние и осенние переходные периоды в пределах 15%. Зимой и летом ошибки минимальны, зимой не более 9% как в положительную, так и в отрицательную сторону, а в летний период от –1 до –2%. Таким образом, можно сказать, что ERA5–Land достаточно хорошо воспроизводит температуру воздуха в горных районах.

В то же время ERA5–Land неудовлетворительно фиксируют суммарные осадки в горных районах – вызывает завышение во всех сезонах. Относительная ошибка зимой составляет от 15 до 70% в зависимости от района (см. рис. 2, б; табл. 2). Минимальная ошибка годовой суммы осадков приходится на внутренние горные системы (менее 50%), где выпадает малое количество осадков (600 мм в год и менее).

Чтобы дать представление об общей изменчивости метеопараметров, в частности, осадков, и её воспроизведении реанализом, на рис. 3 показан многолетний ход годовых сумм осадков данных наблюдений и по реанализу ERA5–Land в координатах станций в случаях наименьших и наибольших ошибок самих значений и коэффициентов корреляции. На станции Баргузинский заповедник (Байкальский район) стандартная ошибка годовых осадков в данных ERA5–Land максимальна и превышает 70% при коэффициенте корреляции 0.68 и занижении тренда на 13%. На станции Сегян-Кюель (Верхоянский хребет) ошибка в значениях сумм осадков в данных ERA5–Land составляет 48% при коэффициенте корреляции 0.82 и занижении тренда на –13%.

В целом распределение относительной ошибки сумм осадков за холодный период соответствует годовому распределению. Весной относительная ошибка максимальна и может превышать 100%. Летом значения завышаются на 40–60%, а

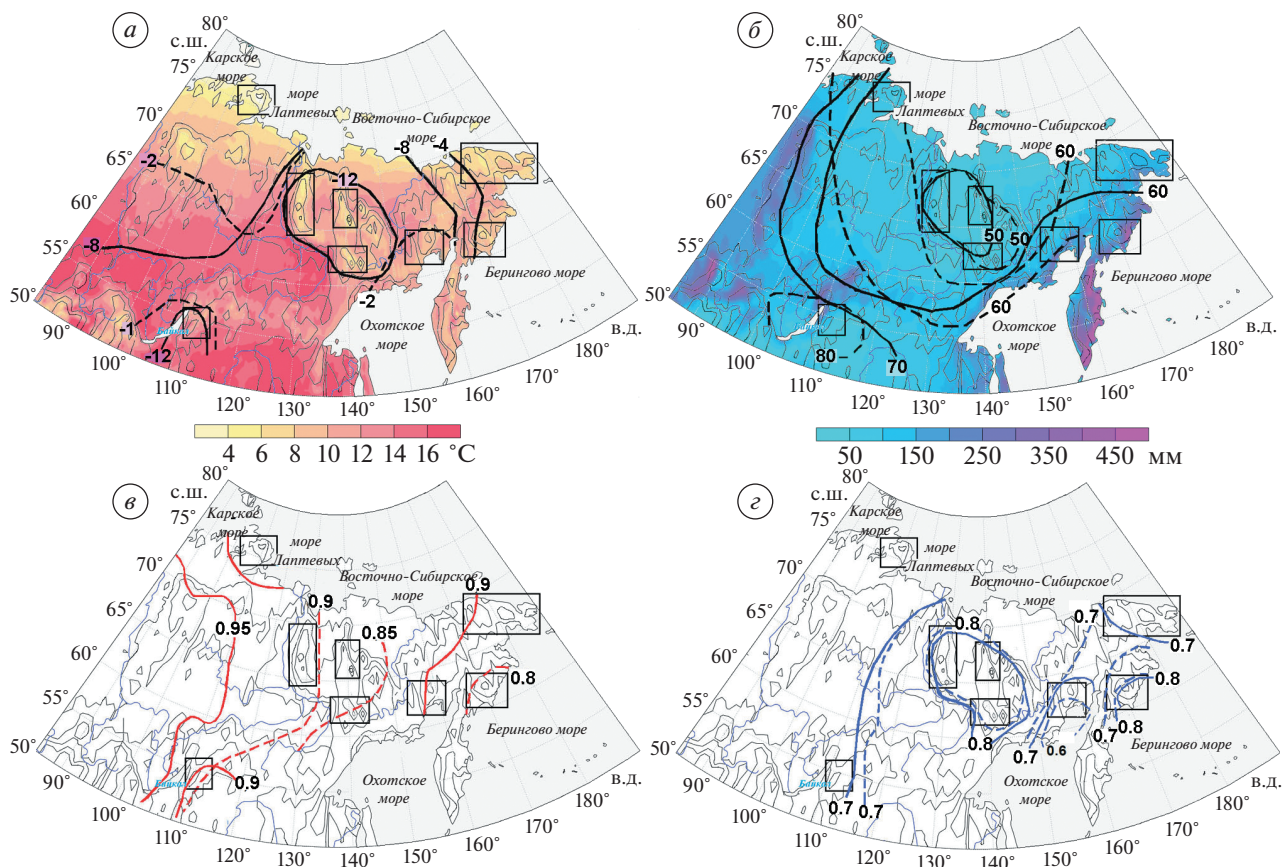


Рис. 2. Сравнение данных реанализа ERA5–Land и станционных наблюдений за период 1966–2021 гг.: (а) средние значения летней температуры (цветная заливка) и относительная ошибка данных температуры ERA5–Land (%) за год (сплошная линия), за лето (пунктир); (б) средние значения сумм осадков холодного периода (цветная заливка) и относительная ошибка данных по осадкам ERA5–Land (%) за год (сплошная линия), за лето (пунктир); (в) коэффициенты корреляции между данными наблюдений и ERA5–Land температуры за год (сплошная линия), за лето (пунктир); (г) коэффициенты корреляции между данными наблюдений и ERA5–Land и осадками за год (сплошная линия) за холодный период (пунктир). Серыми изолиниями показан рельеф, прямоугольниками – исследуемые горные районы.

Fig. 2. Comparison of ERA5–Land reanalysis data and weather stations data for the period 1966–2021: (a) Mean summer temperature (color fill) and relative error of ERA5–Land data, %, for the year (solid line), for the summer (dotted line); (b) mean precipitation for the cold period (color fill) and relative error of ERA5–Land data, %, for the year (solid line), for the summer (dashed line); (c) correlation coefficients between weather stations data and ERA5–Land temperature, per year (solid line), per summer (dashed line); (d) correlation coefficients between weather stations data and ERA5–Land and precipitation, per year (solid line), per cold period (dashed line). Gray isolines show the topography, rectangles show the areas under study.

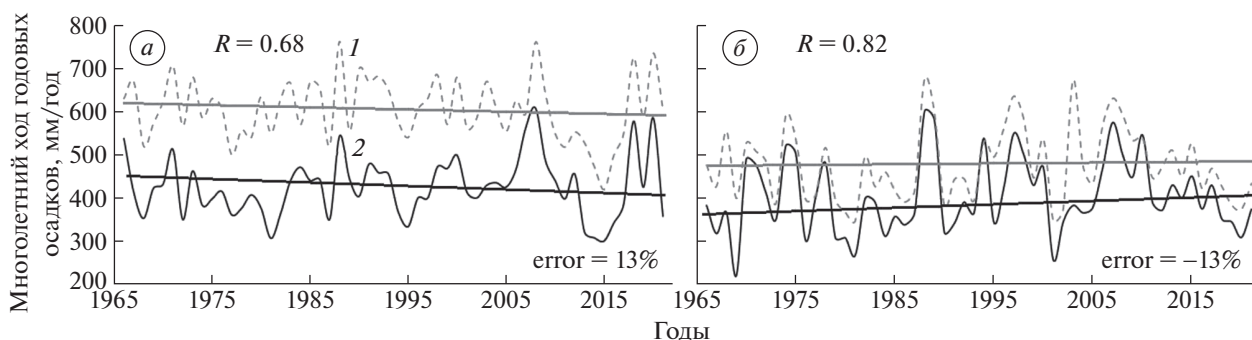


Рис. 3. Воспроизведение данных осадков реанализом ERA5–Land в координатах метеостанций с трендами и коэффициентом корреляции – Баргузинский заповедник (Байкальский регион) (а); Сегян-Кюэль (Верхоянский хребет) (б): 1 – данные метеостанции; 2 – данные ERA5–Land; R – коэффициент корреляции; $error$ – ошибка тренда.

Fig. 3. Reproduction of precipitation data by ERA5–Land reanalysis in weather station coordinates with trends and a correlation coefficient – Barguzin Reserve (Baikal Region) (a); Segyan-Kyuel (Verkhoyansk Range) (b): 1 – weather station data; 2 – ERA5–Land data; R – correlation coefficient; $error$ – trend error.

Таблица 3. Корреляция температуры и осадков реанализа ERA5–Land со стационарными данными в горных районах азиатской части России по сезонам в период 1966–2021 гг.

Район	Температура (T)/Осадки(Pr)				
	год	зима	весна	лето	осень
Хребет Орулган (Верхоянский)	0.92/0.79	0.88/0.81	0.93/0.82	0.94/0.7	0.93/0.82
Хребет Сунтар-Хаята и Черский	0.89/0.8	0.87/0.85	0.92/0.79	0.88/0.77	0.92/0.81
Горы Северного Байкала	0.91/0.65	0.91/0.56	0.94/0.7	0.9/0.67	0.91/0.68
Колымское нагорье	0.8/0.57	0.81/0.48	0.82/0.46	0.8/0.69	0.82/0.63
Корякское нагорье	0.91/0.8	0.89/0.8	0.94/0.75	0.87/0.77	0.92/0.86
Горы Бырранга (Таймыр)	0.88/0.65	0.84/0.64	0.85/0.67	0.91/0.64	0.9/0.66
Чукотское нагорье	0.86/0.68	0.86/0.68	0.88/0.67	0.82/0.65	0.88/0.71

Таблица 4. Относительная ошибка трендов (%) температуры и осадков реанализа ERA5–Land в сравнении с наблюдаемым трендом в горных районах азиатской части России по сезонам в период 1966–2021 гг.

Район	Температура (T) / Осадки(Pr)				
	год	зима	весна	лето	осень
Хребет Орулган (Верхоянский)	–11/–15	–16/–14	–14/–29	–3/–4	–11/–13
Хребет Сунтар-Хаята и Черский	–8/–14	–12/–14	–14/–12	–2/–18	–3/–12
Горы Северного Байкала	1/–13	–1/–15	–17/–25	2/2	19/–13
Колымское нагорье	–1/19	–11/24	0/–5	–2/27	11/29
Корякское нагорье	6/–2	1/17	–3/–14	8/–9	16/0
Горы Бырранга (Таймыр)	–1/–5	–1/–11	–9/23	6/–25	1/–6
Чукотское нагорье	0/–23	–6/–25	–9/–11	12/–43	3/–11

осенью на 40–70%. Существенные расхождения с данными наблюдений исключают возможность использования реанализа ERA5–Land для оценки величин осадков.

Корреляция между значениями температуры реанализа ERA5–Land и данными наблюдений высокая (0.8–0.95) во всех горных районах вне зависимости от сезона года (табл. 3). Коэффициент корреляции для температуры немного ниже в восточных районах (см. рис. 2, в). Связь между суммарными осадками по двум базам данных колеблется в среднем от 0.6 до 0.8. В местах с небольшим количеством осадков (внутренние горные системы) она выше, а при увеличении сумм осадков к востоку коэффициент корреляции снижается (см. рис. 2, г). В результате в горных районах азиатской части России колебания температуры и осадков хорошо синхронизированы в реанализе ERA5–Land с данными наблюдений.

Относительная ошибка трендов температуры около 10% и колеблется как в положительную, так и в отрицательную сторону в зависимости от района (табл. 4). Для трендов годовой температуры характерно их завышение для горных районов Корякского нагорья и Байкальского региона, и занижение значений во внутренних районах

(хребты Верхоянский и Черского, горы Сунтар-Хаята) и на Колымском нагорье (рис. 4, а–б). В летний период тренд температуры завышен с максимумом на 10% во внутренних горных районах (см. рис. 4, б).

Тренды осадков занижены во все сезоны реанализом ERA5–Land во внутренних горных районах (хребты Верхоянский, Черского и Сунтар-Хаята) и в районе северо-востока Байкальского региона до –15%. Максимальная ошибка годового тренда около –23% отмечена на Чукотке (см. рис. 3, в; табл. 4). Тренды годовых осадков завышены на Колымском нагорье на 10%. Ошибка трендов осадков холодного периода в целом немного ниже, но сильно зависит от сезона.

Таким образом, после рассмотрения относительной ошибки значений, трендов и корреляции данных реанализа ERA5–Land с данными наблюдений видно, что данные по температуре хорошо согласуются в значениях температуры и их трендах. Использование суммарных осадков реанализа ERA5–Land удовлетворительно только для оценки их динамики и трендов.

Тренды климатических параметров в горных районах азиатской части России. В работах, посвященных трендам климатических параметров

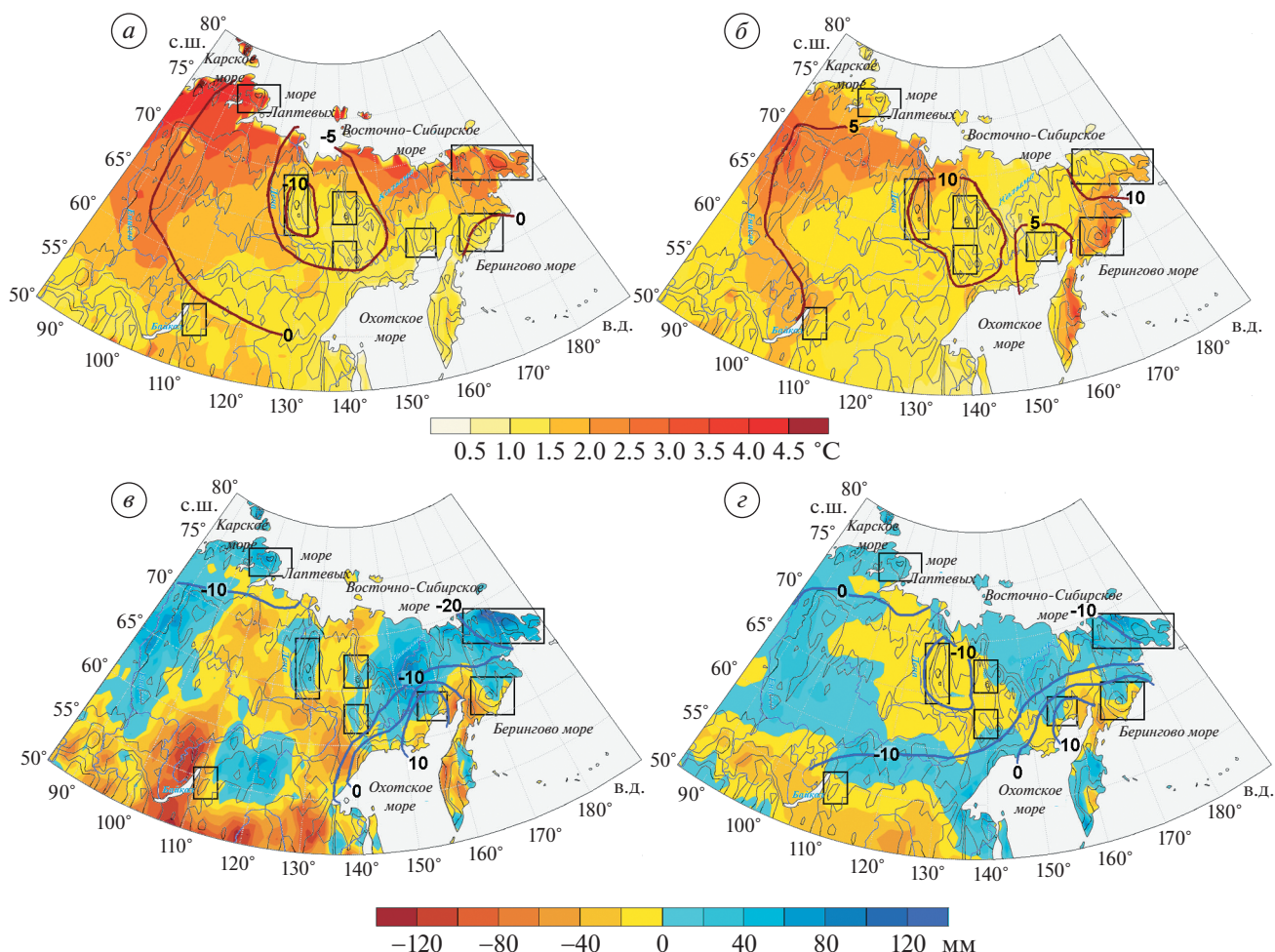


Рис. 4. Тренды параметров (цветная заливка) за 55 лет (1966–2021 гг.): (а) температура за год, °C; (б) температура за летний период, °C; (в) осадки за год, мм; (з) осадки за холодный период, мм. Изолиниями обозначена ошибка тренда (%) по данным реанализа ERA5–Land относительно стационарных наблюдений. Серыми изолиниями показан рельеф, прямоугольниками – исследуемые горные районы.

Fig. 4. Trends of characteristics (color fill) for 55 years (1966–2021): (а) annual temperature, °C; (б) temperature for the summer period, °C; (в) annual precipitation, mm; (з) precipitation for the cold period, mm. The isolines indicate the trend error (%) according to the ERA5–Land reanalysis relative to weather station data. Gray isolines show the topography, rectangles show the areas under study.

на территории Азиатской части России, отмечается, что температура воздуха заметно повысилась в 2001–2019 гг. в северной половине азиатской территории по сравнению с 1966–2000 гг. В целом в Восточной Сибири за 1976–2020 гг. линейный тренд температуры приземного воздуха значимо положителен и составляет 0.6°C за 10 лет. На территории Восточной Сибири преобладает увеличение осадков в южных и восточных районах, с максимальными трендами в переходные сезоны (Переведенцев и др., 2021; Третий..., 2022).

По данным ERA5–Land тренды температуры положительны повсеместно как в среднем за год, так и в летний период (см. рис. 4, а–б). Наибольшие тренды средней годовой температуры харак-

терны для самых северных горных районов – Таймыра и Чукотки (до 4°C за 55 лет). За положительный годовой тренд в большей мере ответственны повышения температуры весной и осенью, что отмечено в (Третий..., 2022). Летние тренды температуры по ERA5–Land ниже и составляют $+1...+2^{\circ}\text{C}$ за 55 лет, при этом ошибка может составлять 6–12%. Наименьшие значения годового тренда от $+0.5$ до $+1.5^{\circ}\text{C}$ за 55 лет приходятся на береговые горные районы – Корякское и Колымское нагорье, находящиеся в умеренных широтах под влиянием морей Тихого океана, что согласуется с ранее полученными результатами (Сточкуте, Василевская, 2018). Во внутренних горных районах (хребет Верхоянский, хребет Черского, горы Сунтар-Хаята) рост температуры

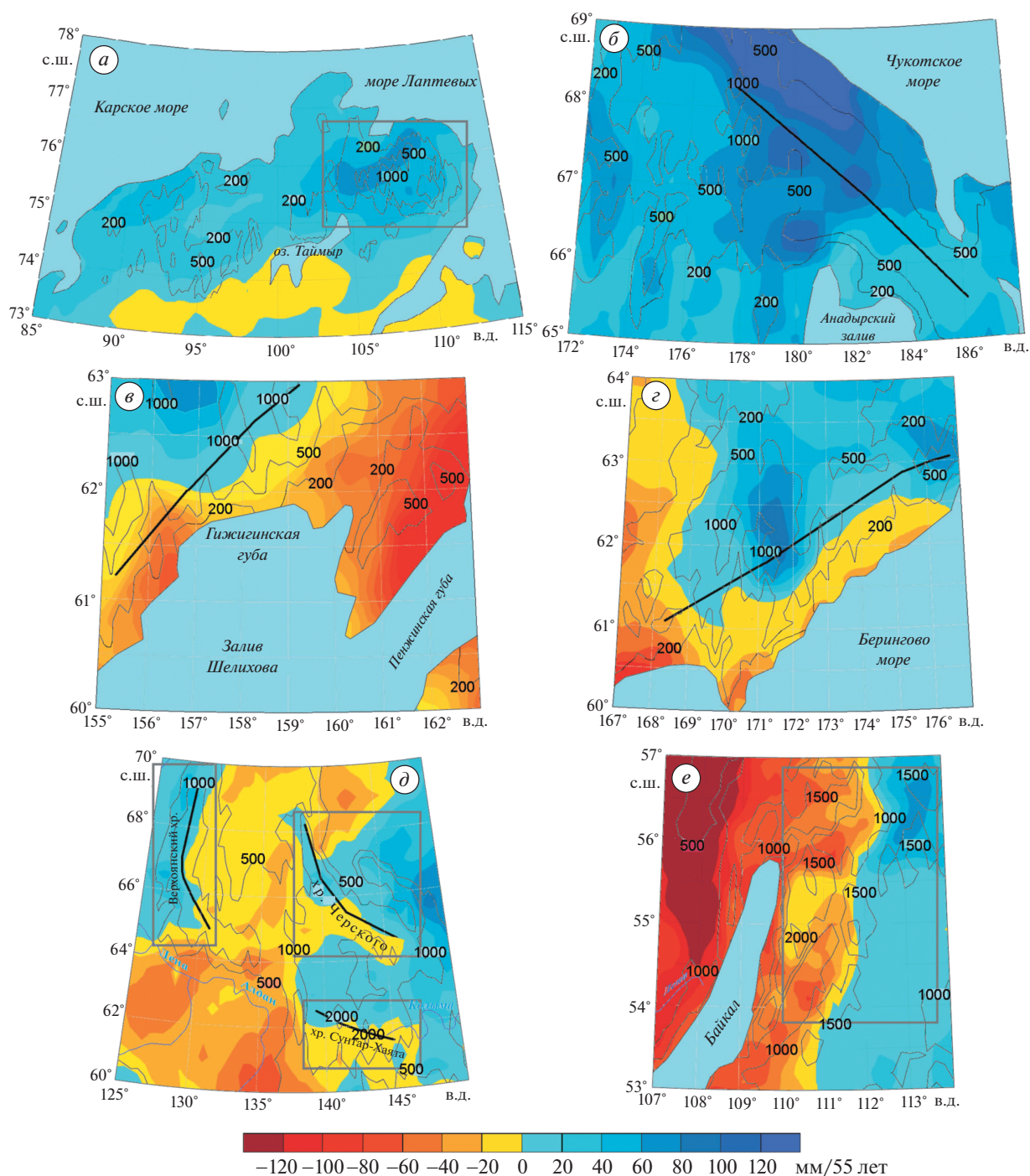


Рис. 5. Тренды годовых сумм осадков за 55 лет (1966–2021 гг.) в исследуемых горных районах (цветная заливка), мм: (а) горы Бырранга; (б) Чукотское нагорье; (в) Колымское нагорье; (г) Корякское нагорье; (д) хребты Верхоянский, Черского и Сунтар-Хаята, (е) Байкальский регион. Серыми изолиниями показан рельеф, линиями схематично обозначены горные хребты.

Fig. 5. Annual precipitation trends for 55 years (1966–2021) in the studied mountain regions (color fill), mm: (a) Byrranga Mountains; (b) Chukotka Highlands; (c) Kolyma Highlands; (d) Koryak Highlands; (e) Ridges Verkhoyansky, Chersky and Suntar-Khayata, (e) Baikal region. The gray isolines show the topography, the lines schematically indicate the mountain ranges.

в основном происходит в летний период — до $+2.5^{\circ}\text{C}$ за 55 лет. Среднегодовой тренд составляет около $+1.5$ – 1.7°C за 55 лет, с учётом его занижения в данных ERA5–Land до 10%. В северо-во-

сточном Байкальском горном регионе положительные тренды температуры в целом за год и в летний период достигают 2.5°C за 55 лет (ошибка тренда минимальна).

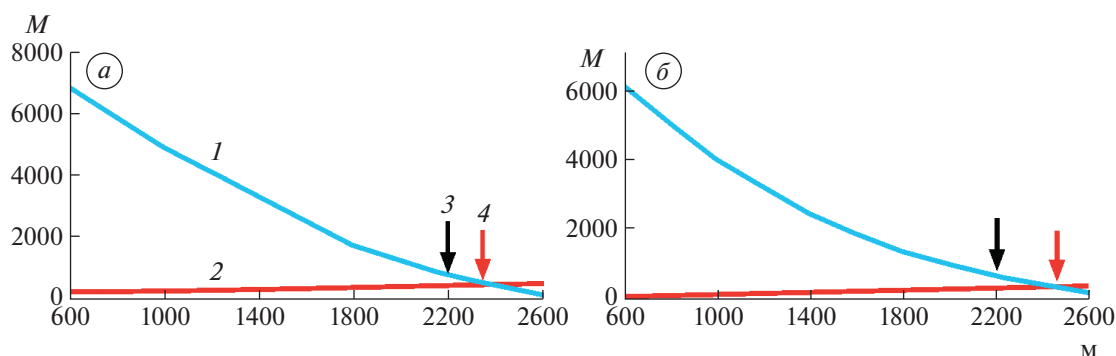


Рис. 6. Примеры профилей абляции и аккумуляции для района ледников Верхоянского хребта (а) и южной части хребта Черского (б): 1 – абляция, мм; 2 – аккумуляция, мм; 3 – ВГП за 1931–1960 гг.; 4 – ВГП расчётная за 1966–2021 гг.

Fig. 6. Examples of ablation and accumulation profiles for glacier areas of Verkhoyansk Range (a) and the southern part of Chersky Range (b): 1 – ablation (in mm); 2 – accumulation (in mm); 3 – ELA for 1931–1960; 4 – estimated ELA for 1966–2021.

Тренды осадков – как годовых, так и холодного периода – неоднородны в рассматриваемых горных системах. Поэтому рассмотрим изменения осадков более подробно (рис. 5, а–е).

Карты трендов, исходя из ERA5–Land, в целом подтверждают общую тенденцию, полученную в результате анализа данных наблюдений (Демченко, Семенов, 2017; Титкова и др., 2018; Бардин и др., 2020; Переведенцев и др., 2021; Третий..., 2022), но отражают особенности, связанные с ориентацией склонов горных систем. Максимальные положительные тренды сумм годовых осадков характерны для гор арктической зоны Таймыра и Чукотки (см. рис. 4, в–г; рис. 5, а–б). Увеличение сумм осадков в северных районах происходит в основном за счёт холодного периода. Анализ данных стационарных наблюдений за 1966–2021 гг. указывает на рост осадков в этом регионе весной и осенью (Третий..., 2022). В горах Бырранга тренд годовых осадков составил около +80 мм за 55 лет, что дает около 20% от средней годовой суммы 1966–2021 гг., при ошибке годовых трендов реанализа в этом районе не более 5%. В холодный период тренд осадков доходит до 50 мм за 55 лет (около 18% от среднего). В Чукотском нагорье тренд годовых осадков составляет +100 мм за 55 лет (25% от средних значений) и холодного периода +60 мм за 55 лет (24% от среднего). Ошибка тренда осадков по ERA5–Land при этом за год доходит до –23% (см. табл. 4), а в холодный период до –16%. Такая оценка показывает, что тренды осадков в Чукотском нагорье могут быть выше полученных.

Увеличение осадков – как годовых, до 60–80 мм за 55 лет (14% от среднего), так и холодного периода, до 40 мм за 55 лет (20% от среднего), – наблюдается на северных склонах Корякского и Колымского нагорий. На южных склонах, где выпадает большее количество осадков (см. рис. 2, б), отмечается отрицательный тренд осадков, как за

год, так и в холодный период, 40 мм за 55 лет, что составляет от среднего около 5 и 10% соответственно. Ошибки трендов в этих районах разнятся от сезона к сезону (зимой занижены, весной увеличены), что позволяет считать указанные тренды правдоподобными из-за некоторой компенсации в оценках трендов по сезонам по ERA5–Land.

Для внутренних горных районов характерны небольшие суммы годовых осадков, не превышающие 600 мм. В районе Верхоянского хребта на западных склонах количество осадков выше, чем на восточных, здесь отмечен положительный тренд осадков за год до 60 мм за 55 лет (12% от среднего). На восточных склонах при меньшем количестве осадков (до 400 мм/год) отмечается отрицательный тренд до 20–40 мм за 55 лет (8% от среднего). В холодный период тренд осадков отрицательный до 20 мм за 55 лет (не более 10%). Восточнее (хребты Черского и Сунтар-Хаята) положительные тренды осадков за год и холодный период больше просматриваются для восточных склонов до 40 мм за 55 лет (10–12%) и отрицательные для западных 20–40 мм за 55 лет (5–8% от среднего). При занижении трендов осадков по ERA5–Land во внутренних горных районах до –15% эти показатели могут приводить к недооценкам трендов осадков.

В районе северо-востока Байкальского региона годовая сумма осадков доходит до 800 мм. Рост осадков на восточных склонах, 100 мм за 55 лет (12% от среднего), совпадает с их сокращением на западных склонах до 80 мм за 55 лет (8% от среднего), как в целом за год, так и в холодный период.

Изменения высоты границы питания ледниковых систем на фоне изменения климата. На рис. 6 представлены примеры расчёта профилей абляции и аккумуляции для хребта Орулган (а) и южной части хребта Черского (б), где производился расчёт изменений ВГП по данным ближайшей

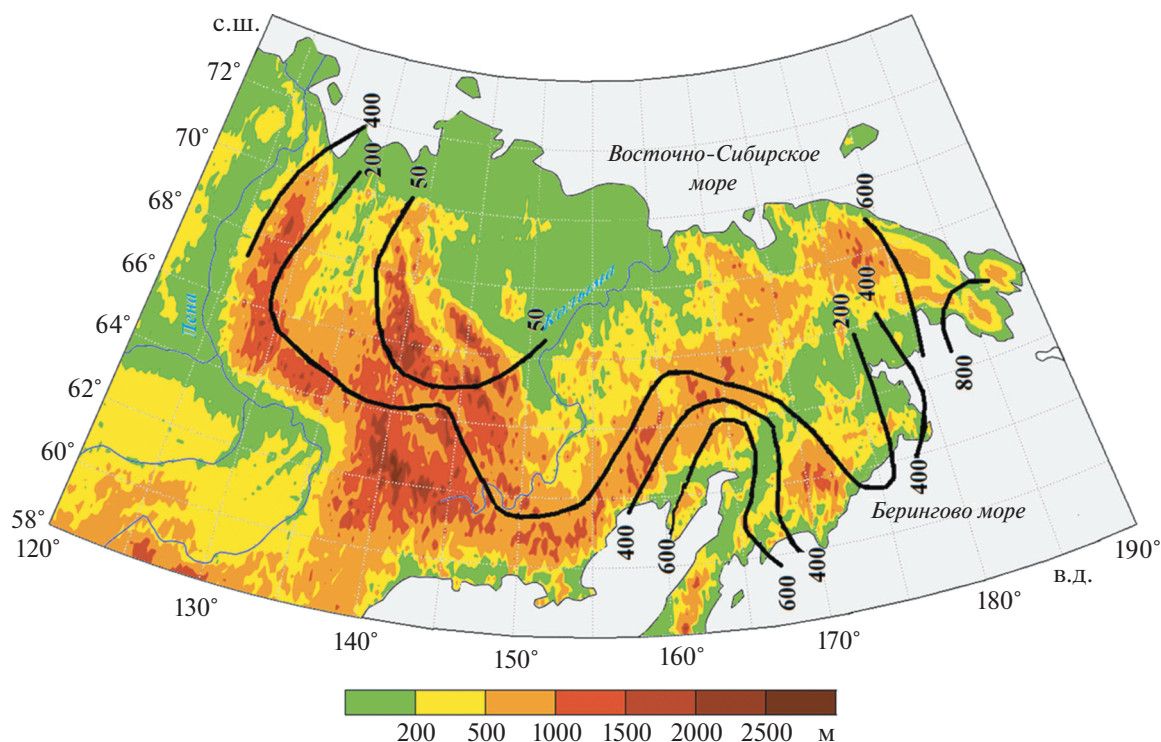


Рис. 7. Подъём высоты границы питания ВГП, м за период 1966–2021 гг. по сравнению с 1930–1960 гг.

Fig. 7. Equilibrium line altitude (ELA) rise (in meters) for the period of 1966–2021 in comparison with the period of 1930–1960.

метеостанции и реанализа ERA5–Land. На рисунке видно, что ВГП в районе хребта Орулган сместилась выше на 200 м, а в южной части хребта Черского на 250 м.

Рассмотрены изменения ВГП за период 1966–2021 гг. по сравнению с предыдущим 30-летием (рис. 7). Оценка ВГП гляциологических систем на северо-востоке Сибири в 1931–1960 гг. представлена в работах (Ананичева, Кренке, 2005; Ананичева, 2018). Подъём высоты ВГП наблюдается во внутриконтинентальных и прибрежных горных системах. Наибольший подъём характерен для западных склонов Верхоянского хребта (до 400 м), восточных склонов Чукотки (до 800 м) и Колымского нагорья (до 600 м). Минимальное повышение ВГП наблюдается на восточном склоне хребта Черского (50 м).

Подъём ВГП приурочен к областям с высокими температурными трендами (см. рис. 4). Высокий подъём ВГП не всегда соответствует областям отрицательных трендов твёрдых осадков. По-видимому, в этих случаях превалирует температурный фактор, что характерно для Корякского нагорья и района между Корякией и Чукоткой.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Оценка погрешности реанализа ERA5–Land различается в зависимости от района исследова-

ния как для температуры, так и для осадков. В горных районах азиатской части России реанализ ERA5–Land с высокой точностью описывает температурный режим с минимальной относительной ошибкой, что также отмечается во всех работах, посвященных данной тематике. По нашим результатам, максимальные ошибки трендов среднегодовой и летней температуры сосредоточены во внутренних горных районах, где количество метеостанций ограничено.

В работе (Григорьев и др., 2022) отмечено, что в среднем по территории России ERA5–Land завышает количество осадков от 14% летом до 37% весной, а зимой ошибка близка к нулю. Суммы осадков завышены до 70% за год и выше в весенний сезон. Это особенно заметно в районах, для которых характерны высокие суммы годовых осадков, как, например, на северо-востоке Байкала. Осадки менее завышены в регионах с минимальной годовой суммой (хребты Верхоянский, Черского и Сунтар-Хаята). При этом синхронность изменений сумм осадков достаточно хорошо выражена. Такие результаты соответствуют выводам, полученным в работе (Kim, Lee, 2022). Таким образом, анализ трендов суммарных осадков должен учитывать ошибки в разные сезоны года во всех рассматриваемых горных системах, принимая во внимание, что в переходные сезоны относительная ошибка трендов осадков доходит

до 30%. Оценка относительной ошибки годовых трендов осадков показывает, что они занижены на Чукотке до 23%, во внутренних горных районах (хребты Верхоянский, Черского и Сунтар-Хаята) до 15%, в районе северо-востока Байкальского региона до 13% и завышены на Колымском нагорье. В горах Бырранга и Корякском нагорье ошибка трендов сумм осадков минимальна.

Положительные температурные тренды разной интенсивности наблюдаются во всех горных районах азиатской части России в среднем за год и в летний период, что неоднократно подтверждено в других исследованиях, собранных в (Третий..., 2022). Максимальное увеличение годовой температуры отмечается в горных системах Арктической зоны России (Таймыр и Чукотка) до $+4^{\circ}\text{C}$ за 55 лет. в основном за счёт повышения температуры в переходные сезоны. Здесь скорее всего сказывается “усиление Арктики” (Латонин и др., 2020). Минимальные положительные тренды среднегодовой температуры характерны для восточных береговых горных районов умеренных широт от $+0.5$ до $+1.5^{\circ}\text{C}$ за 55 лет. (Корякское и Колымское нагорья) при максимальных летних трендах от $+2.5$ до $+4^{\circ}\text{C}$ за 55 лет. Также тренды летних температур максимальны во внутриконтинентальных горных районах (хребты Верхоянский и Черского, горы Сунтар-Хаята, северо-восточный Байкальский регион) до $+2.5^{\circ}\text{C}$ за 55 лет и минимальны в целом за год $+1.5^{\circ}\text{C}$ за 55 лет. В Байкальском регионе тренды температуры в целом за год и в летний период достигают $+2.5^{\circ}\text{C}$ за 55 лет. Можно сделать вывод, что ошибки воспроизведения температуры реанализом невелики, и он приемлем для оценок температур.

Увеличение сумм осадков в арктических районах происходит в основном за счёт холодного периода. Рассмотрение трендов осадков на мезомасштабном уровне показало, что максимальный положительный тренд годовых осадков характерен для гор арктической зоны. Для гор Бырранга это около 100 мм за 55 лет (20% от среднего) при минимальной ошибке трендов, а для Чукотского нагорья уже 130 мм за 55 лет (25% от среднего за 1966–202 гг.), и тренды осадков здесь занижены. Для Корякского и Колымского нагорий отмечены рост осадков на северных склонах до 60–80 мм за 55 лет и падение на южных до 40 мм за 55 лет. В горных системах внутренних и прибрежных районов тренды осадков зависят от ориентации склонов, что связано с направлением преобладающего переноса воздушных масс: за 1966–2021 гг. рост осадков отмечен на восточных склонах на 10–12% от среднего и падение на западных 5–8% от среднего в районах хребтов Черского и Сунтар-Хаята, северо-востока Байкальского региона. И наоборот, рост осадков на западных склонах до 60 мм за 55 лет (12% от среднего) и падение на восточных до 20–40 мм за 55 лет (8% от среднего)

характерны для хребта Верхоянский. Ошибка тренда в этих районах (хребты Верхоянский, Черского и Сунтар-Хаята; Байкальский регион) достаточно велика, поэтому делать оценки осадков по реанализу для этих регионов следует с выверенной оценкой точности.

За период 1966–2021 гг. выявлено увеличение высоты границы питания в горных районах севера России от 50 до 800 м. Эти оценки соответствуют выводам, полученным (Галанин и др., 2013; Khromova et al., 2019). По нашим выводам, наибольший подъем ВГП в период 1966–2021 гг. произошел на западных склонах Верхоянского хребта и восточных склонах Чукотки и Колымского нагорий. Значения подъёма ВГП совпадают с областями высоких температурных трендов. Высокий подъем ВГП не всегда соответствует областям трендов твердых осадков, что говорит о преобладающем влиянии трендов положительных температур в изменении ВГП ледниковых систем.

Для определения изменения гляциологических характеристик в горах реанализ ERA5–Land может возмещать недостающие данные — в первую очередь температур, но и с оценкой точности осадков — на больших высотах, чем данные имеющихся метеостанций

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы Государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009), а также АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004).

Acknowledgments. The paper includes the results obtained withing the framework of the research project АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, as well as АААА-А19-119022190172-5 (FMGE-2019-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананичева М.Д., Кренке А.Н. Эволюция высот климатической снеговой линии и границы питания ледников на северо-востоке Сибири в XX веке // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 225–232.
- Ананичева М.Д., Кренке А.Н. Эволюция полей гляциологических характеристик ледниковых систем северо-востока Сибири // В сб.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 3. Ч. 2. Природные процессы в полярных областях Земли. / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: ИГ РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 125–133.
- Ананичева М.Д. Изменения высоты границы питания ледниковых систем на северо-востоке Сибири в 20-м и начале 21-го веков // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 6. С. 55–63.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-6\(55-63\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-6(55-63))

- Ананичева М.Д., Пакин Г.Ю., Энтин А.Л. Исследования Верхнеангарской группы ледников // Лёд и Снег. 2019. № 59 (3). С. 423–432.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-415>
- Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // The Cryosphere. 2010. № 4. P. 435–445.
- Ananicheva M., Kononov Y., Belozarov E. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands // Bulletin of geography (Physical Geography Series). Nicolaus Copernicus University (NCU), Toruń, Poland. 2020. V. 19. P. 5–18.
- Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В., Самохина О.Ф., Корнева И.А. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 29–46.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швеиц Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 // Электронный ресурс <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных>. Дата обращения: 25.11.2022.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеиц Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 201462 // Электронный ресурс <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>. Дата обращения: 25.11.2022.
- Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 4. С. 30–42.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
<https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
- Демченко П.Ф., Семенов В.А. Оценка неопределенности климатических трендов приповерхностной температуры, связанной с внутренней динамикой атмосферы // Доклады Академии наук. 2017. Т. 476. № 3. С. 339–342.
<https://doi.org/10.7868/S0869565217270202>
- Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 488 с.
- Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылев Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы // Фундаментальная и прикладная геофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 3–24.
<https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
- Муравьев А.А. Изменение размеров ледников Кроноцкого полуострова и массива Алней-Чашаконджа на Камчатке во второй половине XX–начале XXI в. // Лёд и Снег. 2014. Т. 54. № 2. С. 22–28.
- Муравьев А.А., Носенко Г.А. Изменения оледенения северной части Срединного хребта на Камчатке во второй половине XX в. // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 2. С. 5–11.
- Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М., Мирсаева Н.А., Аухадеев Т.Р., Мягков М.А., Парубова Е.М. Изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX–XXI веках // Материалы Междунар. конф., посвящ. памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск, 2021. С. 292–298.
<https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1956-5.2021.1-381>
- Стоцкунте Ю.В., Василевская Л.Н. Зависимость температурно-влажностного режима от региональных атмосферных процессов // Спутник. Естеств. и технич. науки. 2018. № 1. С. 98–101.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Сроки залегания снежного покрова на территории России в начале XXI века по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2017. № 1. С. 25–33.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-25-33>
- Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Семенов В.А. Региональные особенности изменения зимних экстремальных температур и осадков на территории России в 1970–2015 гг. // Лёд и Снег. 2018. № 4. С. 486–497.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-486-497>
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
- Copernicus Publications // Электронный ресурс. URL: <https://publications.copernicus.org> Дата обращения: 11.08.2022.
- Gurney S.D., Popovnin V.V., Shahgedanova M., Stokes C.R. A Glacier Inventory for the Buordakh Massif, Cherskiy Range, Northeast Siberia, and Evidence for Recent Glacier Recession // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2008. № 1. P. 81–88.
- Haeberli W., Zemp M. Mountain glaciers: on thin ice. Mountains and climate change: from understanding to action // Bern, 2009. P. 22–29.
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // Regional Environmental Change. 2019. V. 19. P. 1229–1247.
- Kim M., Lee E. Validation and Comparison of Climate Reanalysis Data in the East Asian Monsoon Region // Atmosphere. V. 2022. № 13. P. 1589.
<https://doi.org/10.3390/atmos13101589>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D., Piles M., Rodríguez-Fernández J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // Earth Syst. Sci. Data. 2021. № 13. P. 4349–4383.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

Special Report IPCC on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate “High Mountain Areas”. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019.

Yamada T., Takahashi Sh., Shiraiwa T., Fudjii Y., Kononov Yu.M., Ananicheva M.D., Koreisha M.M., Muraviev Ya.D., Samborsky T.V. Reconnaissance of the 31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Re-

public, Russian Federation // Japanese Society of Snow and Ice. *Bulletin of Glaciologic Research*. 2002. № 19. P. 101–106.

Kononov Y.M., Ananicheva M.D., Willis I.C. The millennium dynamics of Polar Ural glaciers by high resolution reconstruction of glacier mass balance // *Annals of Glaciology*. 2005. № 42. P. 163–171.

Citation: Titkova T.B., Ananicheva M.D. Using ERA5—Land reanalysis and data from weather stations in the mountainous regions of Russia to assess changes in glacial systems of Eastern Siberia and the Far East. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 199–213. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423020163

Using ERA5—Land Reanalysis and Data from Weather Stations in the Mountainous Regions of Russia to Assess Changes in the Glacial Systems of Eastern Siberia and the Far East

T. B. Titkova^{a, #} and M. D. Ananicheva^a

^a Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]e-mail: titkova@igras.ru

This work involving the study of changes in the glacier equilibrium line altitude (ELA) is a continuance of the glaciological parameters of mountain systems investigation. The article explores the possibility of using new generation climate archives (in this case, ERA5—Land) together with weather station data on temperature and precipitation, in order to assess the climate dependence of the glacial system ELA in hard-to-reach and insufficiently studied mountain regions of the Russia Asian part. The ERA5—Land reanalysis reproduces temperature (values, dynamics, and trends) quite well in mountain systems. The use of total precipitation is possible only for assessing their dynamics and trends. The relative error for temperature trend is below 20% in both positive and negative sides, and precipitation is less than 30% in the negative one. Positive temperature trends of different intensity are observed in all mountains of the Russia Asian part with a maximum in the mountain systems of the Arctic zone. Minimal temperature trends are distinctive for coastal mountain regions of temperate latitudes. Summer temperature trends are maximum in inland areas and minimum in coastal mountain areas. The increase in precipitation in such areas occurs mainly at the expense of the cold period. It was revealed there was an increase of the glacial systems ELA from 50 to 800 m in the mountain regions of the Asian North Russia within 1966–2021. The value of the ELA rise coincides with areas of high temperature trends and may not correspond to precipitation negative trends.

Keywords: mountain regions, equilibrium line altitude, ERA5—Land, temperature trends, precipitation trends

REFERENCES

- Ananicheva M.D., Krenke A.N. Evolution of the heights of the climatic snow line and the boundary of glacier feeding in the north-east of Siberia in the XX century. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 225–232 [In Russian].
- Ananicheva M.D., Krenke A.N. Evolution of the fields of glaciological characteristics of glacial systems in the northeast of Siberia. *V sb. Izmenenie okruzhayushchej sredy i klimata: prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy*. T. 3. Ch. 2. *Prirodnye processy v polyarnykh oblastyakh Zemli*. Environmental and climate change: natural and related man-made disasters, T. 3. P. 2. Natural processes in the polar regions of the Earth. Moscow: Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 2008: 125–133 [In Russian].
- Ananicheva M.D. Changes in the height of the feeding boundary of glacial systems in the northeast of Siberia in the 20th and early 21st centuries. *Kriosfera Zemli. Cryosphere of the Earth*. 2018, 22 (6): 55–63. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-6\(55-63\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-6(55-63)) [In Russian].
- Ananicheva M.D., Pakin G.Yu., Entin A.L. Research of the Upper Angara group of glaciers. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (3): 423–432 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-415>
- Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios. *The Cryosphere*. 2010, 4: 435–445.
- Ananicheva M., Kononov Y., Belozarov E. Contemporary state of glaciers in Chukotka and Kolyma highlands. *Bulletin of geography (Physical Geography Series)*. Nicolaus Copernicus University (NCU), Toruń, Poland. 2020, 19: 5–18.

- Bardin M.Yu., Rankova E.Ya., Platova T.V., Samokhina O.F., Korneva I.A. Modern changes in the surface climate based on the results of regular monitoring. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2020, 5: 29–46 [In Russian].
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. (a) Description of the dataset of monthly precipitation totals at stations in Russia. Certificate of state registration of the database No. 2015620394. Retrieved from: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (Last access: 25 November 2022) [In Russian].
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. (b) Description of the data array of mean monthly air temperature at stations in Russia. Certificate of state registration of the database No. 201462. Retrieved from: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (Last access: 25 November 2022) [In Russian].
- Galanin A.A., Lytkin V.M., Fedorov A.N., Kadota T. Reduction of glaciers in the Suntar-Khayat Mountains and methodological aspects of its assessment. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (4): 30–42 [In Russian].
- Grigoriev V.Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M. Spatio-temporal variability of precipitation reproduction error by ERA5 reanalysis on the territory of Russia. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Seriya geograficheskaya*. Proc. of RAS. Geographical series. 2022, 86 (3): 435–446 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
- Demchenko P.F., Semenov V.A. Estimation of the Uncertainty of Climatic Trends in Surface Temperature Associated with Internal Atmospheric. *Doklady Rossiiskoy Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2017, 476 (3): 339–342 [In Russian].
<https://doi.org/10.7868/S0869565217270202>
- Krenke A.N. Mass transfer in glacial systems on the territory of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1982: 488 [In Russian].
- Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms. *Fundamental'naya i prikladnaya geofizika*. Fundamental and applied geophysics. 2020, 13 (3): 3–24 [In Russian].
<https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
- Muravyov A.Ya. Glaciation change in the northern part of the middle range on the Kamchatka peninsula in the second half of the XX century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 54 (2): 22–28 [In Russian].
- Muravyov A.Ya., Nosenko G.A. Glaciation change in the northern part of the middle range on the Kamchatka peninsula in the second half of the XX century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (2): 5–11 [In Russian].
- Perevedentsev Yu.P., Sherstyukov B.G., Shantalinsky K.M., Mirsaeva N.A., Aukhadeev T.R., Myagkov M.A., Parubova E.M. Changes in air temperature and atmospheric precipitation on territory of Russia in the XX–XXI centuries. Materials of the International conference dedicated to the memory of Nina Konstantinovna Kononova. Irkutsk, 2021: 292–298 [In Russian].
<https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1956-5.2021.1-381>
- Stochkute Yu.V., Vasilevskaya L.N. Dependence of the temperature and humidity regime on regional atmospheric processes. *Sputnik. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. Satellite. Natural and technical sciences. 2018, 1: 98–101 [In Russian].
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. The timing of the occurrence of snow cover on the territory of Russia at the beginning of the 21st century according to satellite data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 1: 25–33 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-25-3>
- 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, 4: 486–497 [In Russian].
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-486-497>
- The third assessment report on climate change and their consequences on the territory of the Russian Federation. Saint Petersburg: Science-intensive technologies. 2022: 676 p. [In Russian].
- Copernicus Publications. Retrieved from: <https://publications.copernicus.org> (Last access: 11 August 2022).
- Gurney S.D., Popovnin V.V., Shahgedanova M., Stokes C.R. A Glacier Inventory for the Buordakh Massif, Cherskiy Range, Northeast Siberia, and Evidence for Recent Glacier Recession // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2008, 1: 81–88.
- Haerberli W., Zemp M. Mountain glaciers: on thin ice. Mountains and climate change: from understanding to action. Bern. 2009: 22–29.
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // Regional Environmental Change. 2019, 19: 1229–1247.
- Kim M., Lee E. Validation and Comparison of Climate Reanalysis Data in the East Asian Monsoon Region // Atmosphere. 2022, 13: 1589.
<https://doi.org/10.3390/atmos13101589>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D., Piles M., Rodríguez-Fernández J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*. 2021, 13: 4349–4383.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Special Report IPCC on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate “High Mountain Areas”. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019.
- Yamada T., Takahashi Sh., Shiraiwa T., Fudjii Y., Kononov Yu.M., Ananicheva M.D., Koreisha M.M., Muraviev Ya.D., Samborsky T.V., Reconnaissance of the 31 Glacier in the Suntar-Khayata Range, Sakha Republic, Russian Federation. Japanese Society of Snow and Ice. *Bulletin of Glaciologic research*. 2002, 19: 101–106.
- Kononov Y.M., Ananicheva M.D., Willis I.C. The millennium dynamics of Polar Ural glaciers by high resolution reconstruction of glacier mass balance // *Annals of Glaciology*. 2005, 42: 163–171.