

## ДИНАМИКА ЛЕДНИКОВ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ И ДРУГИХ РАЙОНОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

© 2025 г. М. Д. Ананичева<sup>1,\*</sup>, А. А. Абрамов<sup>1</sup>, М. М. Адаменко<sup>2</sup>, И. А. Корнева<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Сибирский индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

<sup>3</sup>Институт природных и технических систем, Севастополь, Россия

\*e-mail: maranan@gmail.com

Поступила в редакцию 19.06.2025 г.

После доработки 14.08.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

В горных хребтах, обрамляющих Среднесибирское плоскогорье, оледенение представлено преимущественно малыми формами: небольшими ледниками, снежно-ледовыми образованиями. Определены контуры ледников в Кузнецком Алатау и Прибайкалье (хребты Байкальский, Баргузинский и Верхнеангарский), а также на Таймыре (горы Бырранга) по снимкам Sentinel-2. С 1960-х (горы Бырранга, Байкальский регион) и 1980-х годов (Кузнецкий Алатау) оледенение этих районов претерпело значительное сокращение, что хорошо согласуется с наблюдаемыми изменениями климата. Контуры ледников и снежно-ледовых образований в Кузнецком Алатау определялись на основе августовских снимков Sentinel-2 2021 и 2023 годов. Всего было идентифицировано 78 ледников (53 из них описаны в каталоге ледников СССР), остальные определены впервые, и 57 снежно-ледовых образований, при этом с 1980 г. их площадь сократилась на 50–75 %. Наибольшее сокращение испытали прислоновые ледники, за ними следуют каровые. Оценки параметров ледников по спутниковым снимкам были верифицированы данными экспедиции в район исследований в августе 2024 г. На основе архивных снимков Corona и Hexagon 1960 и 1973 гг. для двух узлов оледенения Кузнецкого Алатау оценены различия между площадями и высотами расположения ледников, полученными по этим снимкам и Каталогу ледников СССР (данные 1970-х годов). Значения площади ледников и снежно-ледовых образований могут год от года как уменьшаться (из-за потепления климата и или недостатка зимних осадков), так и незначительно увеличиваться (из-за усиленного метелевого переноса снега, накопления твёрдых осадков на подветренных склонах в понижениях рельефа, лавин и более прохладного лета). Связь колебаний размеров ледников с климатическими параметрами (температура и осадки) оценивалась с использованием реанализа ERA5-Land. Параметры оледенения и климатических условий Кузнецкого Алатау сравниваются с аналогичными, полученными ранее для гор Бырранга и Прибайкалья.

**Ключевые слова:** Кузнецкий Алатау, Центральная Сибирь, ледник, площадь ледника, спутниковый снимок, изменение климата, температура, осадки, реанализ ERA5-Land

**DOI:** 10.7868/S2412376525040028

### ВВЕДЕНИЕ

Центральная Сибирь включает в себя обширные территории восточнее р. Енисей. Большая часть лежит в пределах Сибирской платформы, на севере расположены Северо-Сибирская низменность и полуостров Таймыр. Омывается морями Лаптевых и Карским, на юге граничит с Восточным

Саяном, хребтами Прибайкалья, Патомским и Алданским нагорьями.

На Крайнем Севере простираются горы Бырранг – низкогорные глыбовые массивы с выровненной поверхностью. Оледенение на полуострове Таймыр расположено в самой высокой его части – горах Бырранга. Горы протягиваются на 1100 км

от Енисейского залива Карского моря на юго-западе до моря Лаптевых на северо-востоке, ширина до 200 км. Горы Кузнецкого Алатау простираются в субмеридиональном направлении на 300 км. Это самый северо-западный регион Алтае-Саянской горной страны. Особенностью рельефа гор Кузнецкого Алатау служит распространённая резкая асимметрия западного и восточного макросклонов. Восточный склон массивов (Канымское нагорье, горный узел Тигертыш и др.) имеет расчленённый рельеф с глубоко врезанными долинами, ледниковыми каррами, среди которых преобладают ступенчатые, и моренами. Западный макросклон относительно пологий. Рельеф невысоких хребтов

представлен лишь отдельными ледниковыми каррами на подветренном макросклоне.

В юго-восточной части находятся горные хребты Прибайкалья (Байкальский, Баргузинский, Верхнеангарский), на которых развито оледенение малых форм в основном в глубоких затенённых карах ниже снеговой линии. В центральной части расположено Среднесибирское плоскогорье (рис. 1).

Изучение динамики ледников в этих регионах имеет важное значение для понимания реакции криосферы на изменения климата. Первые систематизированные данные по оледенению России в рамках международных геофизических года

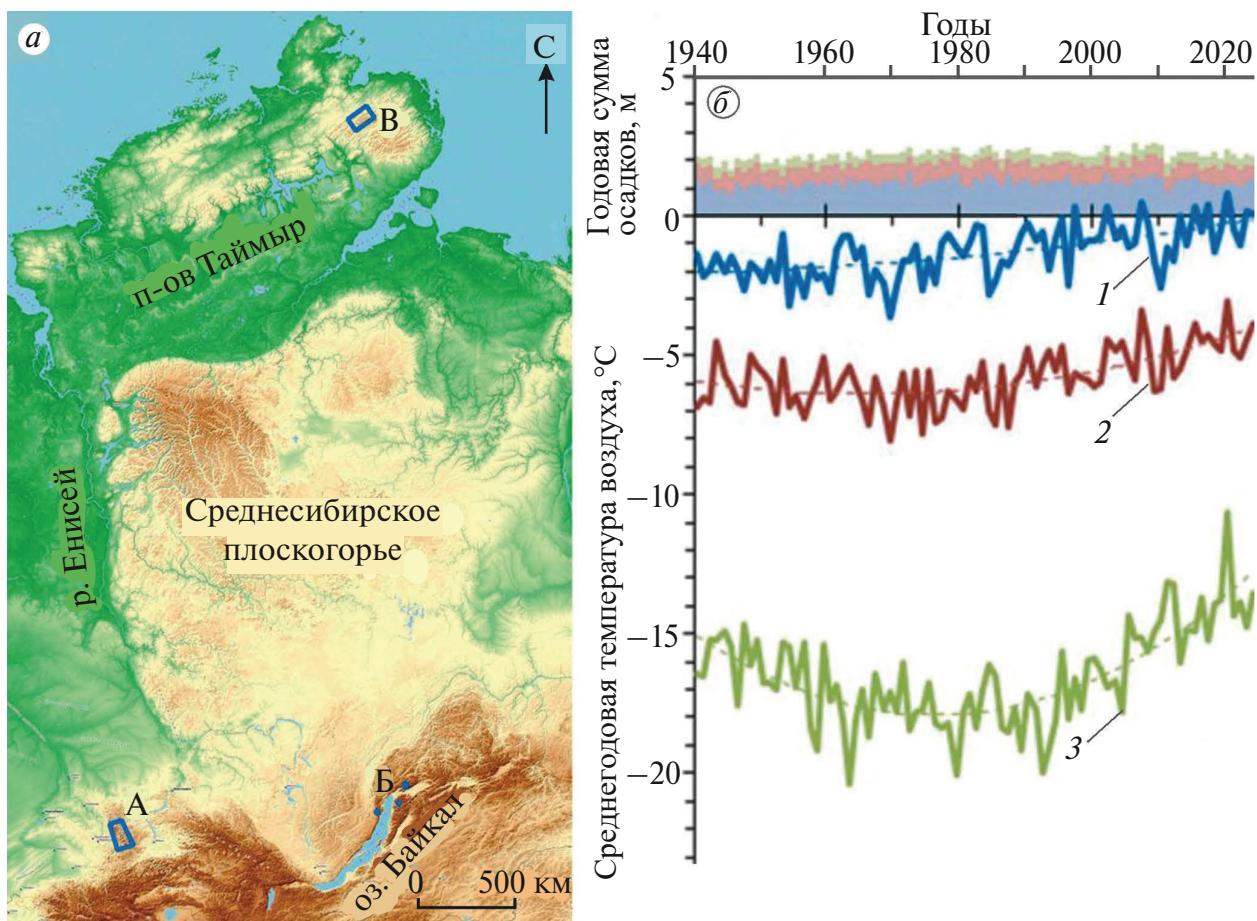


Рис. 1. Карта района и климатические параметры по данным реанализа ERA5-Land.

(а): А – Кузнецкий Алатау, Б – Северное Прибайкалье, В – Горы Бырранга.  
(б): годовая сумма осадков и средняя годовая температура воздуха в Кузнецком Алатау – 1, в Северном Прибайкалье – 2, в горах Бырранга – 3

**Fig. 1.** Map of the study area and climatic parameters based on ERA5-Land reanalysis data.

(а): А – Kuznetsky Alatau, Б – Northern Baikal region, В – Byrranga Mountains.

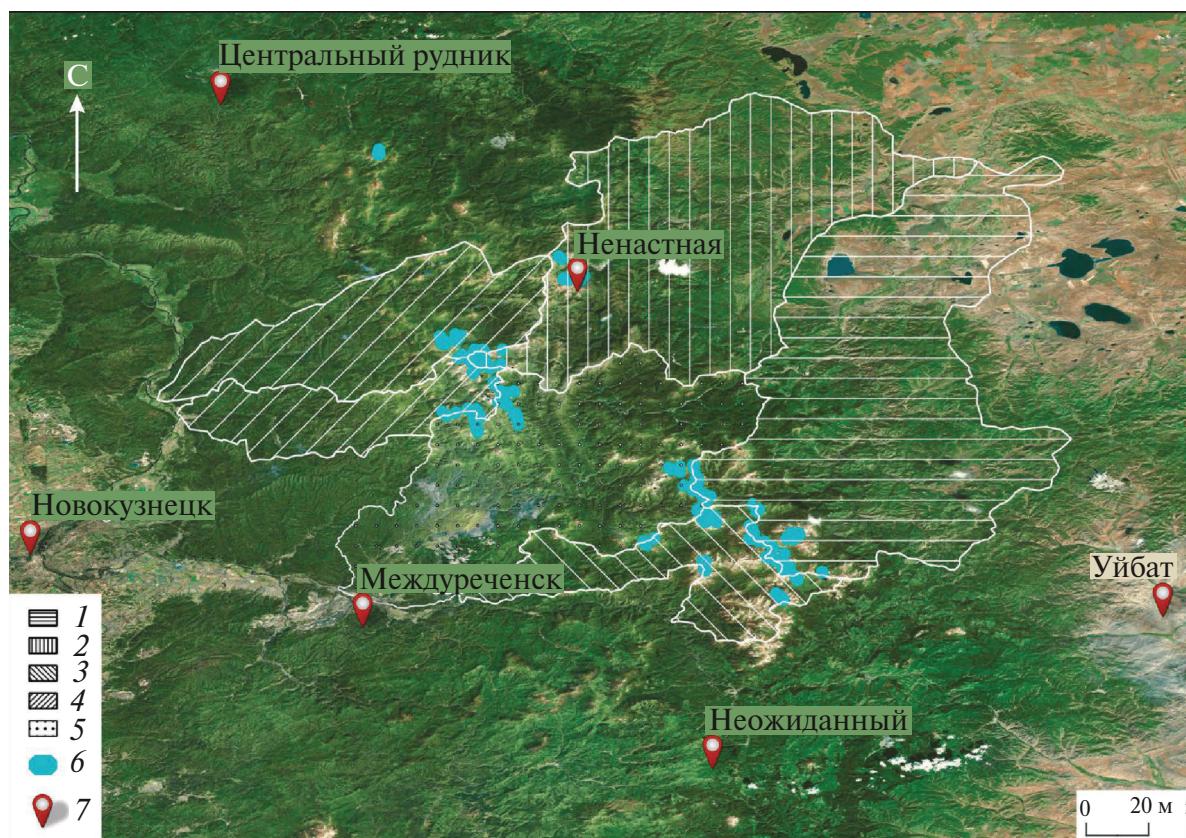
(б): Annual precipitation and mean annual air temperatures: Kuznetsky Alatau – 1, Northern Baikal region – 2, Byrranga Mountains – 3

(МГГ) и десятилетия (МГД) были собраны в каталоге ледников СССР (Каталог..., 1980), а к 2021 г. обновлены в электронном каталоге ледников России (Хромова и др., 2021). Однако для корректного сравнения колебаний ледников (в особенности небольшого размера) в разных районах необходимо унифицировать методы дешифрирования ледников по спутниковым снимкам. В статье представлены результаты исследований, основанных на интеграции архивных и современных данных космических снимков (включая съемку с БПЛА) с полевыми наблюдениями. Для гор Бырранга использованы данные 2022 г. (Ананичева, Корнева, 2024), для Прибайкалья – материалы экспедиций 2019–2021 гг. (Ананичева и др., 2021). Основное внимание в статье уделено ледникам Кузнецкого Алатау, изученным в 2021–2024 гг. (Ananicheva et al., 2025).

Анализ данных снимков последнего региона проводился по выделенным речным бассейнам, принимающим талые воды ледников (рис. 2).

Изучение динамики малых форм оледенения (небольшие ледники, снежники) в условиях современного потепления климата – важная задача для оценки водных ресурсов и прогнозирования природных рисков в горных регионах. Получены оценки для ледников Корякского нагорья по снимкам Sentinel-2 и Corona (Ананичева, Кононов, 2025). Центральная Сибирь, включая Кузнецкий Алатау, Прибайкалье и горы Бырранга, остаётся недостаточно исследованной в этом аспекте, несмотря на активное сокращение ледников в последние десятилетия.

Цель работы – выявить пространственно-временные закономерности деградации ледников в этих регионах на основе комплексного анализа дистанционных и полевых данных, а также оценить



**Рис. 2.** Карта района Кузнецкого Алатау. Разной штриховкой показаны границы речных/ледниковых бассейнов: 1 – Белый Июс, 2 – Черный Июс, 3 – Бельсу и Казыр, 4 – Верхняя и Средняя Терсь, 5 – Уса, 6 – ледники (вне масштаба), 7 – метеостанции

**Fig. 2.** Map of the Kuznetsky Alatau region. The boundaries of the river/glacial basins are shown in different patterns: 1 – White Iyus, 2 – Black Iyus, 3 – Belsu and Kazyr, 4 – Upper and middle Ters, 5 – Usa, 6 – glaciers (not in scale), 7 – weather stations

их связь с климатическими трендами. Кроме того, авторы попробовали выявить критерий отличия ледников от снежно-ледовых образований, поскольку пионер исследования оледенения Кузнецкого Алатау – П.С. Шпинь, выделял ледники и снежно-ледовые образования (далее – С-ЛО), куда вошли переходные формы от ледников к снежникам. В работе придерживаемся его терминологии. И ледники малых размеров и снежно-ледовые образования Кузнецкого Алатау относятся к устоявшемуся термину – малые формы оледенения. Отделение ледников от снежно-ледовых образований – актуальная задача.

Связь динамики оледенения с климатом впервые для Кузнецкого Алатау количественно проанализирована в работе Адаменко и др. (2017, *а*), показавшей, что небольшие прислоновые ледники и снежно-ледовые образования (в этой работе под снежно-ледовыми образованиями подразумевались многолетние снежники) значительно деградировали (растаяло 70–90 % площади) из-за повышения температуры. Некоторые ледники перешли в категорию многолетних снежников. Крупные каровые ледники, расположенные на подветренных склонах широких водоразделов в отрицательных формах рельефа, отступили лишь незначительно. В работе Адаменко и др. (2017, *б*) приведена подробная информация об изменении площадей ледников Карагаш № 56, Черно-Июсский № 83 и Центральный № 87 в 1975–2015 гг., полученная по данным полевых измерений и дистанционных методов зондирования. Потери площади за 1975–2015 гг. составили: у ледников Карагаш – 46 %, Центральный – 40 %, Чёрно-Июсский – 26 %.

Детальные данные на основе дешифрирования снимков Sentinel-2 представлены в исследовании (Ananicheva et al., 2025), где подтверждена тенденция к фрагментации ледников. В статье в анализ включены даже небольшие снежно-ледовые образования (до 0.01 км<sup>2</sup>) и определены критерии их отличия от ледников.

Сокращение оледенения под влиянием потепления климата документировано для многих горных систем Азии (Шереметова, Шереметов, 2015). Например, в Российском Алтае (Северо-Чуйский и Южно-Чуйский хребты) за период 1952–2004 гг. площадь ледников уменьшилась на 19.7 ± 5.8 %, что коррелирует с ростом летних температур на 0.10–0.13 °C/год с 1980-х годов (Shahgedanova et al., 2010). Хотя климатические условия Кузнецкого Алатау отличаются меньшей континентальностью, близкие тренды наблюдаются и здесь. В нашем исследовании учтены ледники площадью менее 0.02 км<sup>2</sup>, тогда как в статье

(Shahgedanova et al., 2010) анализировались только объекты площадью более 0.5 км<sup>2</sup>.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе для оценки современного состояния и недавнего прошлого ледников и снежно-ледовых образований использованы следующие материалы: а) снимки КН-1 Corona 18.08.1960, разрешение 7.5 м/пиксель; и КН-9 Hexagon за 1960–1979: 11.08.1973, 07.09.1976, 12.08.1979, разрешение 2 м/пиксель; каталог ледников СССР на регион Кузнецкого Алатау (Каталог..., 1980). Съёмка ледников проводилась в июле–августе 1969–1975 гг.; б) электронный каталог “Ледники России” (Хромова и др., 2021, 2022); в) спутниковые снимки Sentinel-2 за август 2021 и 2023 гг., пространственное разрешение 10 м; г) снимки ключевых ледников с БПЛА за 2022 и 2024 гг.; д) данные измерений метеостанций (табл. 1; их расположение см. на рис. 2); данные реанализа ERA5-Land: температура и осадки, в узлах сетки 0.1° × 0.1° с 1967 по 2023 г. с месячным разрешением. Контуры ледников выделялись вручную по методике международного проекта GLIMS (Raup, Khalsa, 2010) в программе ArcGIS-ArcMap.

Погрешность дешифрирования зависит в основном от проведения границы лёд/склон. Важно определить, что считать границей и в какое время, поскольку часто она спорна из-за наличия сезонного снежного покрова, обломочного материала, теней и пр. Точность зависит от разрешения снимка, размера ледников и др. С учётом разрешения снимков 2 до 10 м/пиксель и малого размера объектов (от 0.01 до 0.15 км<sup>2</sup>) общая погрешность определения площади может достигать 10–15 %. Съёмка с БПЛА нескольких ледников также использовалась для проверки контуров, определённых по снимкам Sentinel-2.

Для определения высот нижней и верхней точек каждого ледника использовалась ЦМР ASTER GDEM V3 с 30 м разрешением.

Снимки Corona и Hexagon ортотрансформировались по характерным точкам рельефа, использовались от 60 до 90 опорных точек. В качестве базового рельефа для орто-трансформирования применена цифровая модель рельефа Copernicus с пространственным разрешением 30 м (OpenTopography..., 2025) и мозаика ESR (рис. 3, *а–в*).

**Съёмка с БПЛА.** Съёмка с БПЛА (DJI Mavic 2 Pro, DJI Mavic 3 Classic, Autel Evo) осуществлялась в июле–августе 2022 и 2024 гг., с высоты 200 м, с перекрытием. Построение ортофотопланов

**Таблица 1.** Осреднённые значения климатических показателей по данным метеостанций за 1967–2023 гг.: температура воздуха,  $T_{\text{year}}$  – среднегодовая,  $T_{\text{sum}}$  среднелетняя; сумма осадков,  $P_{\text{year}}$  – за год,  $P_{\text{warm period}}$  – за тёплый период (июнь–сентябрь),  $P_{\text{cold period}}$  – за холодный период (остальные месяцы года)

**Table 1.** Mean climatic parameters from weather station data (1967–2023): air temperature ( $T_{\text{year}}$  – annual mean,  $T_{\text{sum}}$  – summer mean); precipitation totals ( $P_{\text{year}}$  – annual,  $P_{\text{warm period}}$  – warm season (June–September),  $P_{\text{cold period}}$  – cold season (remaining months)

Метеостанция	Широта	Долгота	Высота м над ур. моря	$T_{\text{year}}$ , °C	$T_{\text{sum}}$ , °C	$P_{\text{year}}$ , мм	$P_{\text{warm period}}$ , мм	$P_{\text{cold period}}$ , мм
Новокузнецк	53.9	87.1	237	1.87	17.36	469	338	132
Междуреченск	51.62	88.17	256	1.45	17.07	516	387	514
Уйбат	53.72	90.37	525	0.78	16.37	272	250	22
Неожиданный	53.28	89.07	526	-0.32	15.26	862	463	399
Ненастная	54.75	88.82	1188	-1.71	11.89	1594	939	654
Центральный рудник	55.2	87.65	498	0.70	15.43	985	464	522

и ЦМР проводилось в Agisoft Metashape. Съёмку проводили в Тигертышском районе (Поднебесные Зубья): снято два ключевых ледника Карагаш и Тронова, и в Июсской ледниковой группе – ледники Чуракова, Толмачева, Центральный, Черно-Июсский. Разрешение ортофотопланов составило 0.15 м/пиксель, что позволяет использовать эти данные для оценки точности съёмок ледников другими способами. Снимки использовались для верификации контуров ледников по данным дешифрирования снимков Sentinel-2 и оценки динамики сокращения сезонного снежного покрова.

Для оценки климатических изменений применены данные реанализа ERA5-Land за 1975–2023 гг. Это последняя версия реанализа Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) для территории суши с высоким разрешением (9 км). Реанализ ERA5-land представляет собой синтез различных данных наблюдений и моделирования гидродинамической климатической моделью. Были использованы данные о температуре воздуха и количестве атмосферных осадков со среднемесячным разрешением на исследуемый регион за разные периоды времени. Линейный тренд рассчитывали по методу наименьших квадратов, его значимость определяли по параметрическому критерию Стьюдента.

В англоязычных публикациях для малых форм ледников используют термин “glacieret”, признаками которых являются: “малый размер; практически полное отсутствие движения; области аккумуляции и абляции не чётко различимы; структура потока отсутствует как минимум два года подряд; характерны кратковременные изменения

внешнего вида” (Rau et all, 2005, с. 9). Эти объекты также выделялись при работе со снимками.

## ОПИСАНИЕ ЛЕДНИКОВ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

С момента обнаружения в 1967 г. ледники в Кузнецком Алатау привлекали внимание разных групп исследователей (Шпинь, 1980, Сюбаев, Ковалев, 2004, Коваленко, 2008, Адаменко, Гутак, 2017). К началу 1980-х годов в горах Кузнецкого Алатау П.С. Шпинем выявлен 91 ледник общей площадью 6.79 км<sup>2</sup> (Каталог..., 1980). На основе анализа спутниковых снимков Sentinel-2 за 2016–2019 гг. был зафиксирован 101 ледник общей площадью 3.4 км<sup>2</sup>, это данные электронного каталога “Ледники России” (Хромова и др., 2021). Разделения в этом каталоге на собственно ледники и снежно-ледовые образования не было.

В Кузнецком Алатау превалируют ледники северо-восточной и восточной экспозиции (70%). Их толщина – от нескольких метров до 60–70 м (Шпинь, 1980). Общей спецификой оледенения гор Кузнецкого Алатау, помимо небольших размеров ледников и снежно-ледовых образований (0.01–0.15 км<sup>2</sup>), является также высокое снегонакопление на ледниках, до 8000–10000 мм в слое воды (Шпинь, 1975, 1980).

Первоначально выделялось множество морфологических типов ледников, включая висячие. На современном этапе мы констатируем наличие лишь двух типов – каровые и прислоновые. Каровые ледники существуют на затенённых стенах древних цирков (каров). В Кузнецком Алатау

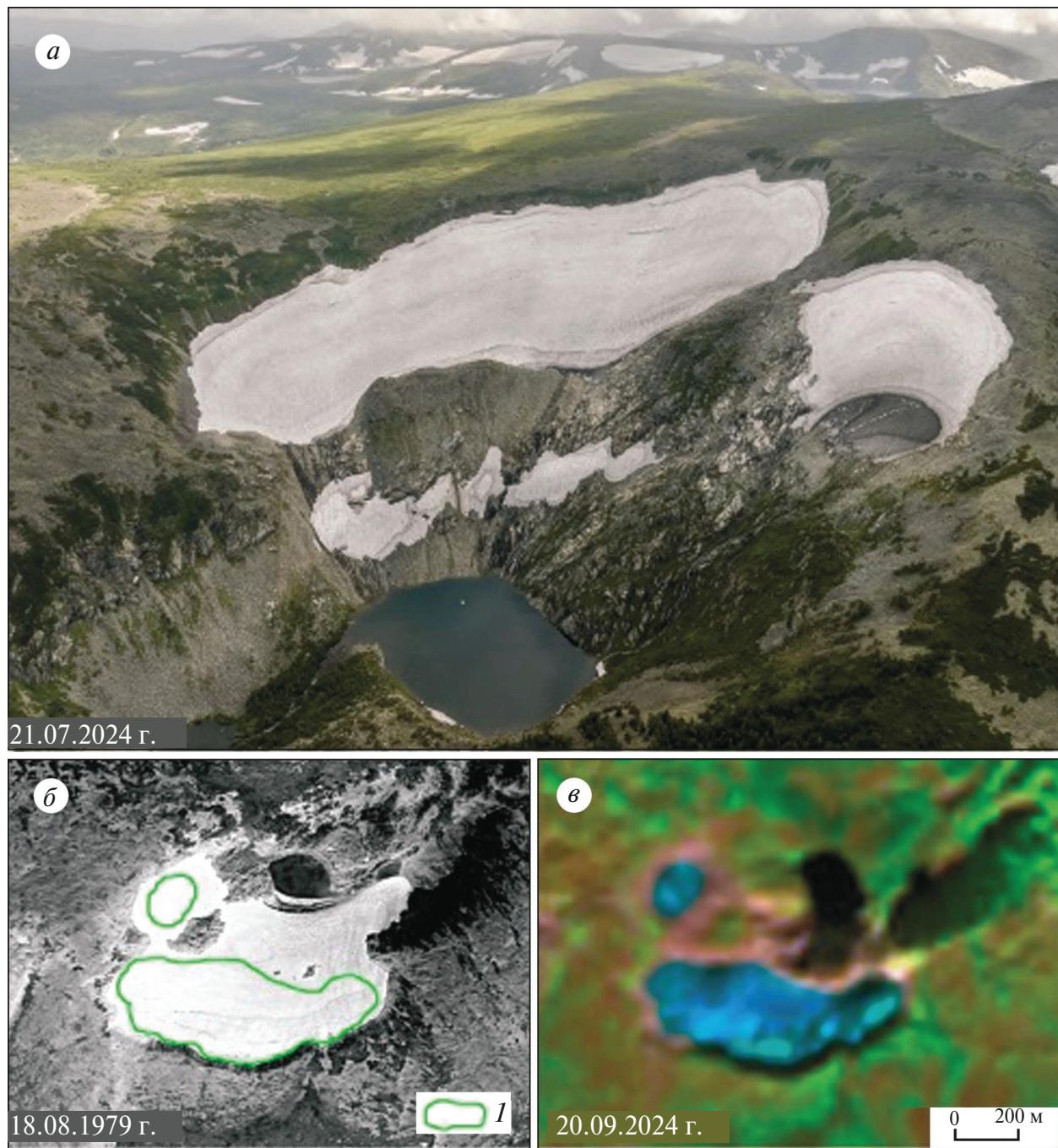


Рис. 3. Ледник Участников Экспедиции: общий вид с севера (а), на снимке Hexagon KH-9 (б), на снимке Sentinel-2 (в): 1 – контур ледника на снимке Sentinel-2 на сентябрь 2024 г.

Fig. 3. Uchastnikov Ekspeditsii Glacier: general view from the north (a), in the Hexagon KH-9 image (б), in the Sentinel-2 image: (в): 1 – glacier outline in the Sentinel-2 image, September 2024

такие ледники не занимают целиком впадины кашров, а прилегает к их задним стенкам. Дно цирков часто занято озёрами, от которых ледники отделены моренами. Прислоновые ледники покрывают

большие площади горных склонов, располагаясь непосредственно под линией водораздела или под бровками горных террас (пример прислоновых ледников – на рис. 4, б–в). Они составляют более

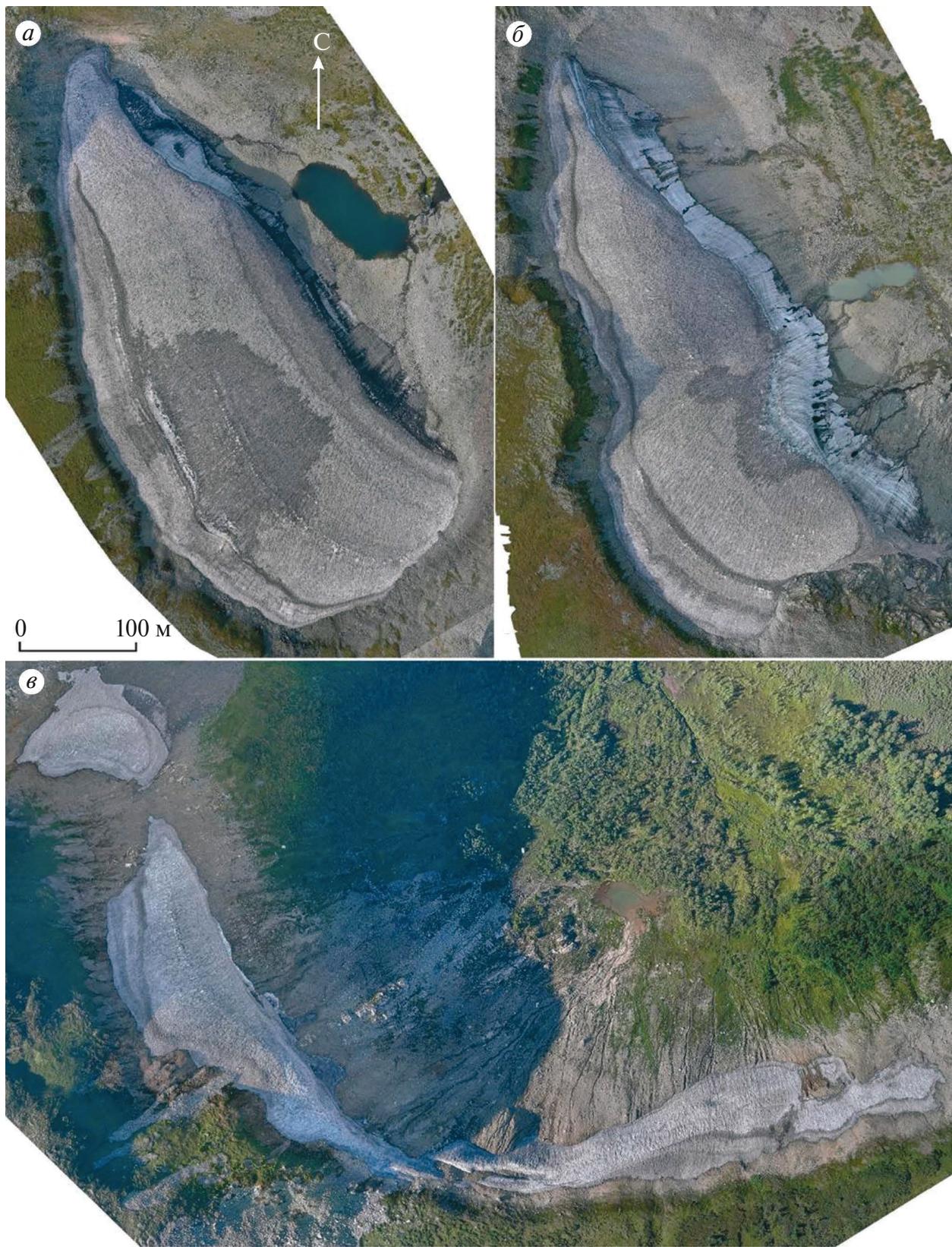


Рис. 4. Ледники Июсской группы на 15.08.2024: Центральный (а), Чуракова (б), Черно-Июсский (в)  
Fig. 4. Glaciers of the Iyus group on August 15, 2024: Central (a), Churakova (б), Cherno-Iyussky (в)

половины от общего количества ледников Кузнецкого Алатау и обычно характеризуются выпуклой формой.

Выделены ледниковые формы, переходные от присклонового к каровому типу, например – ледник Участников экспедиции (см. рис. 3, *a*), Центральный (№ 87 по Каталогу ледников СССР, см. рис. 4, *a*). Помимо собственно ледников, в районе были описаны снежники с ледяным ядром (или многолетние снежники), которые П.С. Шпинь назвал снежно-ледовыми образованиями. По итогам своих полевых исследований он выделил 28 снежно-ледовых образований площадью 1.71 км<sup>2</sup>. Отмечено, что с 1970-х годов ледники и снежно-ледовые образования Кузнецкого Алатау изменились неоднородно: многие объекты, классифицированные как ледники, полностью стаяли и перешли в разряд снежно-ледовых образований, но стоит отметить, что среди таких объектов имеются и вполне стабильные.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе по снимкам Sentinel-2 2023 г. было идентифицировано 135 объектов, 57 из них отнесены к переходным снежно-ледовым образованиям, остальные – к ледникам. Как было сказано выше, в своём исследовании П.С. Шпинь идентифицировал 91 ледник и 28 снежно-ледовых образований. Таким образом, с помощью методов дистанционного зондирования (далее – ДЗЗ) обнаружено больше объектов, но в результате применения критерии, описанных ниже, было выявлено, что снежно-ледовые образования составляют большее число, чем в каталоге П.С. Шпиня, что связано с климатическими тенденциями в регионе, а также с размером объектов и их морфологическими особенностями.

При исследовании методами ДЗЗ, в отличие от ледников, для снежно-ледовых образований характерно сильное изменение пространственной конфигурации – контуры объектов в конце сезонов аблации 2018, 2021 и 2023 гг. не соответствуют друг другу. Данный критерий выявления переходных снежно-ледовых образований был апробирован командой исследователей на плато Путорана (Коваленко и др., 2023) и хорошо зарекомендовал себя. Для отнесения к подобным образованиям использовались также следующие критерии: площадь менее 0.02 км<sup>2</sup>; форма объекта – несхожесть с ледниками формами; при натурных наблюдениях признаками считались: сложение объекта фирмом; отсутствие ледяного ядра и годовой слоистости; отсутствие движения

(нет провисlostи годовых слоёв, формирующейся морены, трещин разрыва; время непрерывного существования объекта от нескольких лет до первых десятилетий).

В целом, физико-географические условия Кузнецкого Алатау делают возможным разграничение между снежно-ледовыми образованиями и ледниками, но это остаётся достаточно сложной задачей. Преувеличение или недооценка количества ледников за счёт многолетних снежников, динамика которых кардинально отличается, может “размыть” истинную картину ледниковых условий в регионе и ввести в заблуждение относительно оценки текущих реакций горных геосистем (Адаменко, Гутак, 2017).

Безусловно, главным отличием снежно-ледового образования от ледника служит отсутствие ледяного ядра, что в условиях Кузнецкого Алатау можно диагностировать по совокупности признаков: сложения однородным фирмом, без видимых тёмных слоёв; повторение формы склона, вогнутый профиль; малая мощность и площадь, что просматривается в промоинах и разрывах.

*Оценка состояния ледников по архивным снимкам Corona и Hexagon (1960–1980 гг.).* В архиве обнаружены несколько снимков – на район Июсских ледников (1960 г.) – охват 22 ледников, на южную часть Кузнецкого Алатау (1973 г.) – охват 8 ледников, среди них каровые ледники Карагаш, Тронова, а также карово-прислоновые ледники Малый и Дальний. Результаты дешифрирования сравнивались с данными каталога ледников СССР (Каталог..., 1980). Разница между площадями (D, %) по спутниковым снимкам (S<sub>1960</sub>) и Каталогу ледников (S<sub>1967</sub>) – в Июсской группе для 9 ледников из 22 составляет от 30 до 60 %, в основном площади S<sub>1967</sub> меньше S<sub>1960</sub>. Для остальных ледников этой группы показатель находится в пределах от 0 до 25 %. Этот факт можно объяснить, помимо погрешностей дешифрирования снимков (не более 15 %), неопределённостью при подсчёте площадей в Каталоге с разницей в датах аэрофотосъёмок и снимка. Площади в Каталоге (1980) определялись по аэрофотоснимкам разных лет. Основные даты аэрофотосъёмок – 1951–1953 гг. Это первые аэрофотоснимки, на которых П.С. Шпинь обнаружил ледники и выявил среди них каровые, висячие и прислоновые ледники площадью от 0.01 до 0.3 км<sup>2</sup>. По аэрофотосъёмке 1966 г. и позже по экспедиционным исследованиям вплоть до 1975 г. П.С. Шпинь уточнял динамику ледников. По ним он отметил, что некоторые ледники

увеличили площадь по сравнению с 1950-ми годами. В этой группе – ледники небольшой площади, разница (D, %) в силу накопления погрешностей может быть достаточно большой. Сравнение площадей для южной группы ледников (бассейн р. Белый Июс) показало, что разница велика для ледника Тронова (44 %) и для Подсальского (по нашему мнению, это снежно-ледовое образование) – 60 %, для остальных она не превышает 25 %. Ледники этой группы одни из самых крупных в Кузнецком Алатау, и разница D, % для них имеет тенденцию увеличиваться с уменьшением площади ледников.

**Оценка состояния ледников по снимкам Sentinel-2 (2021–2023 гг).** Климатические изменения не могли не вызвать реакцию оледенения. После 1980-х годов ледники региона в целом показали тенденцию отступания вплоть до начала XXI века. Наибольшее сокращение площади ледников наблюдалось в 2002–2004 гг.: прислоновые ледники и снежно-ледовые образования сильно деградировали (их площадь сократилась на 60–90 %) из-за повышения температуры в период аблации. Однако с 2004 по 2015 г. произошло заметное увеличение площади ледников, связанное с погодными условиями этих лет (Адаменко и др., 2017). С 2005 г. каровые ледники демонстрировали тенденцию приращения площади, что, вероятно, вызвано ростом количества осадков. Например, с 2004 по 2015 г. площадь ледников Карагаш и Центральный увеличилась соответственно на 0.02 и 0.04 км<sup>2</sup> (15 и 20 % от площади по Каталогу ледников СССР). Прибавление площади ледника Карагаш сопровождалось увеличением толщины льда, что выявили съёмки фронта ледника в 2005 и 2015 гг.

В 2023 г. проведено сравнение сокращения площади ледников и снежно-ледовых образований (снимки Sentinel-2) с данными Каталога ледников СССР на этот регион (табл. 2). В этой таблице также приведены средние по бассейнам данные изменения высотных уровней (низшей и высшей точек) ледников.

Все объекты (суммарно ледники и снежно-ледовые образования) значительно потеряли в площади с 1980 г. Максимум приходится на ледники бассейна р. Уса (в нём много снежно-ледовых образований и не слишком много ледников), минимум – на бассейн р. Терси (примерно равное количество снежно-ледяных образований и ледников). Уровни верхних отметок либо не изменились, либо уменьшились в среднем для бассейна от 13 до 26 м. Индивидуальные ледники имеют опускание Dh\_high до 100 м. Высоты низких отметок повысились от 8 до 44 м в среднем по бассейну, для некоторых ледников повышение составило 120 м. Больше всего сократились площади доминирующих здесь прислоновых ледников.

Наиболее всего сократились ледники северо-восточной и восточной экспозиции, что связано с недостатком питания, а снежно-ледовые образования максимально сокращались на склонах северной и северо-восточной экспозиции. В бассейне р. Уса, где много снежно-ледовых образований северо-западных румбов, их сокращение максимально. Ледники восточной экспозиции бассейнов Белого и Чёрного Июса также сократились. Основные факторы, влияющие на это распределение: особенности местной атмосферной циркуляции, а также положение хребтов относительно воздушных масс и ветров, приносящих осадки.

**Таблица 2.** Сокращение площади ледников и снежно-ледовых образований (D<sub>area</sub>, %) и изменение средних значений низших (DH\_low) и высших точек (DH\_high) ледников, м за 1980–2023 гг.

**Table 2.** Glacier and snow-ice formation area reduction (D<sub>area</sub>, %) and changes in mean lowest (DH\_low) and highest (DH\_high) glacier elevations (m) for 1980–2023

Бассейны	ВСЕ	Только ледники	Ледники	
			Cр. DH_low	Cр. DH_high
Р. Терси	54.8	51.5	8	-13
Р. Уса	75.2	64.1	42	0
Реки Бельсу и Казыр	58.9	58.9	44	-22
Р. Белый Июс	67.5	56.7	17	-20
Р. Черный Июс	61.0	52.5	8	-26

Характерные особенности ледников изучаемого района — их небольшие размеры, расположение на низких высотах, большая чувствительность к метеопараметрам (осадкам и температуре, а также направлению и силе ветров, приносящих осадки), поэтому колебания площади от года к году могут быть как в сторону уменьшения площади на фоне потепления климата, так и в сторону некоторого её роста.

Имеет место высокая изменчивость площадей за указанные периоды времени; ледники в основном сокращали свою площадь. В период 2018–2023 гг. многие ледники в бассейне р. Терсы увеличили свою площадь, в остальных бассейнах такого не наблюдалось, а период 2021–2023 гг. ознаменовался ростом числа ледников, увеличивших свою площадь во всех бассейнах. Увеличение небольшое ( $0.04–0.001 \text{ км}^2$ ), но с учётом малой площади самих ледников эти цифры превышают 60 % (бассейны рек Бельсу, Казыр и Черный Июс).

### СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДНИКОВ С КОЛЕБАНИЯМИ КЛИМАТА

Тенденции климатических изменений, определённые авторами только по метеостанциям (были рассчитаны линейные тренды для каждой метеостанции из табл. 1), и важных для ледников параметров климата — температуры лета  $T_{\text{sum}}$  (период аблации) и осадков холодного периода  $P_{\text{cold period}}$  (время аккумуляции) таковы: небольшой положительный тренд  $T_{\text{sum}}$  ( $1^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается в направлении с юго-запада на северо-восток Кузнецкого Алатау. Твёрдые осадки за упомянутый период выросли на  $100–200 \text{ мм}$  с юго-востока к центральной и северной частям региона. Это фоновая картина, поскольку основана на данных метеостанций, в основном расположенных на небольшой высоте.

Судя по данным ГМС Ненастная (1188 м над ур. моря) — самой высоко расположенной станции в районе исследований, находящейся вблизи климатической снеговой линии, — линейные тренды положительны для обоих типов и составляют  $\sim 2^{\circ}\text{C}$ , тренды осадков почти нулевые. Все станции, использованные в данной работе, демонстрируют позитивный температурный тренд с 1984–1985 гг., который продолжается вплоть до настоящего времени. Потепление началось спустя пять лет после выхода Каталога ледников СССР и монографии П.С. Шпиня (1980). Такие показатели климата за последние 40 лет не способствуют поддержанию и тем

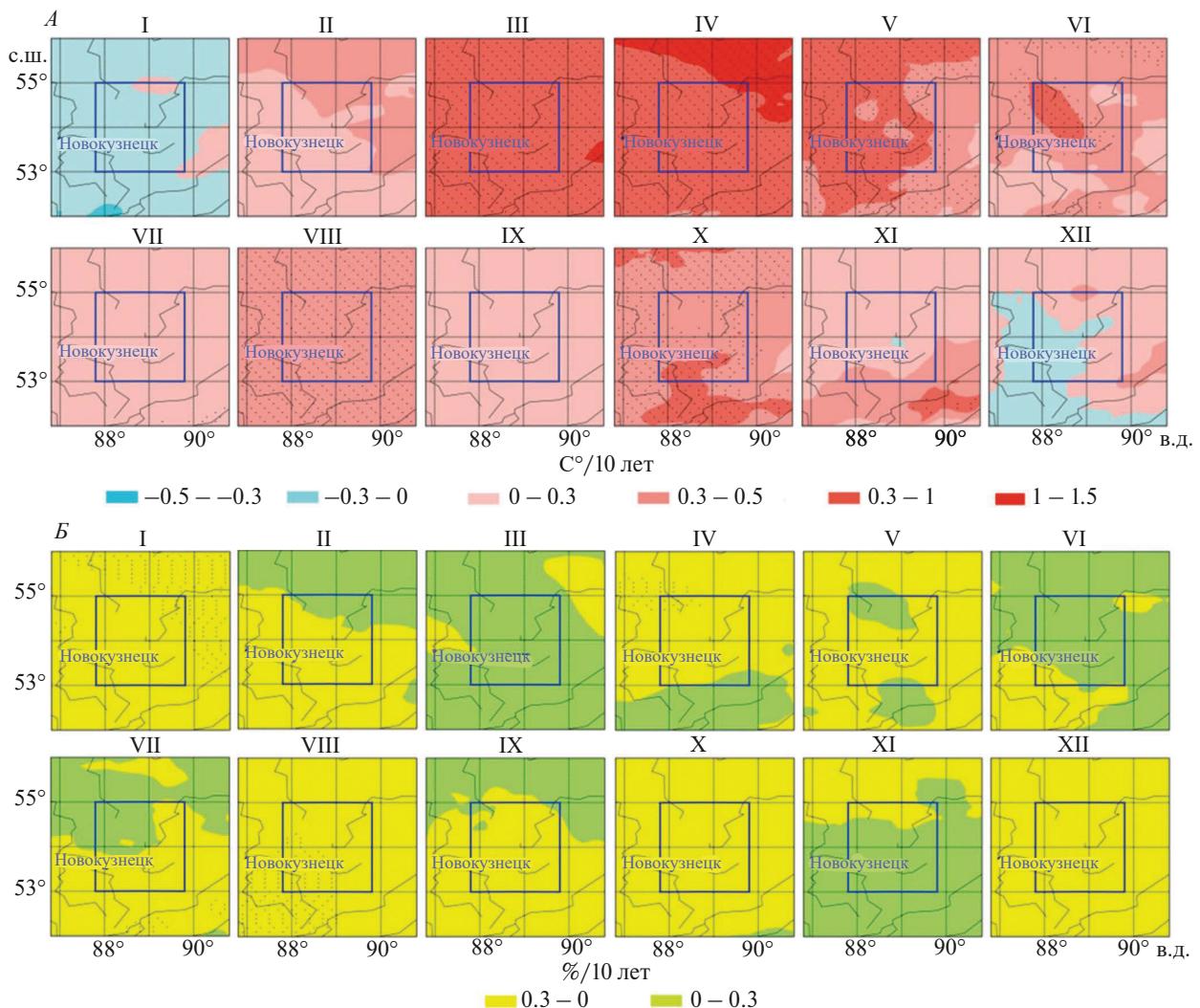
более развитию объектов криосферы (ледников и снежно-ледовых образований) Кузнецкого Алатау.

Применение реанализа ERA5-land в целом обосновано для анализа климатических тенденций в крупном горном регионе. Получены следующие результаты. На рис. 5, *a* представлены тренды температуры воздуха по месяцам ( $^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$ ) за период 1975–2023 гг. Видно, что наиболее сильное и статистически значимое потепление происходит весной ( $0.7–1.0^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$ ), при этом для сезона аблации максимальное потепление наблюдается в мае (до  $+0.7^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$ ) и октябре ( $0.5^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$ ). Эти тенденции могут приводить к более раннему началу сезона аблации и более позднему его окончанию. Что касается изменений осадков за 1975–2023 гг. (см. рис. 5, *b*), то во все месяцы существенных и статистически значимых изменений практически не происходит — все тренды меньше 1 % за 10 лет. Тренд-анализ (по МНК) данных наблюдений на ГМС Ненастная (1967–2021) выявил достоверный рост годовых осадков ( $+11.2 \text{ мм}/\text{декаду}$ ), обусловленный преимущественно летними месяцами, и стабилизацию зимних осадков несмотря на потепление.

На рис. 5, *b* представлены тренды температуры воздуха по месяцам сезона аблации (май–сентябрь) за разные периоды времени: 1975–2004 гг. (когда ледники региона сокращались), 2005–2015 гг. (когда ледники региона имели тенденцию к росту), 2005–2023 гг. В первый период (1975–2004 гг.) потепление происходило во все месяцы, за исключением сентября, максимально — в мае и августе (см. рис. 5, *b-1*), а в период 2005–2015 гг., когда в регионе наблюдалось увеличение баланса массы ледников, наоборот, в мае, июле и сентябре наблюдались отрицательные тенденции температуры (см. рис. 5, *b-2*), и отрицательная тенденция в июле сохранялась вплоть до 2023 г. (см. рис. 5, *b-3*).

В конце XX века (1975–2004 гг.) и в начале XXI века (2005–2015 гг.) также наблюдаются некоторые различия в тенденциях количества осадков в сезон аккумуляции (октябрь–апрель) (рис. 6): в первый период значимых изменений не произошло, а в начале XXI века есть некоторая тенденция к увеличению осадков, статистически значимая для ледников на северо-западе области.

Таким образом, детальный анализ динамики температуры воздуха и осадков по данным реанализа ERA5-Land показал, что в период 1975–2004 гг. сокращение площади ледников



**Рис. 5.** Коэффициенты тренда температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) по месяцам за 1975–2023 гг. в регионе исследований. Область расположения ледников Кузнецкого Алатау обозначена прямоугольником. Точками показаны ячейки, где тренд значим на 5%-м уровне статистической значимости (A); тренды количества атмосферных осадков по месяцам за весь период исследований 1975–2023 гг. (B); пространственное распределение коэффициентов тренда температуры воздуха за май–сентябрь (слева–направо) за периоды 1975–2004 гг. (a), 2005–2015 гг. (б), 2005–2023 гг. (в) (B)

**Fig. 5.** Air temperature trend coefficients ( $^{\circ}\text{C}/10$  years) by month (I–XII) for 1975–2023 in the study region. The area of the Kuznetsky Alatau glaciers is indicated by a rectangle. Dots indicate cells where the trend is significant at the 5% level of statistical significance. (A); trend coefficients of the amount of atmospheric precipitation by month (I–XII) for the entire study period 1975–2023 (B); spatial distribution of air temperature trend coefficients for May–September (V–IX) for the periods 1975–2004 (a), 2005–2015 (б), 2005–2023 (в) (B)

Южной группы (Караташ, Тронова и др.) и Июсских ледников можно объяснить интенсивным повышением температуры воздуха в сезон аблации – максимально в мае (на  $1.2$ – $1.4$   $^{\circ}\text{C}/10$  лет) и августе ( $+0.7$ – $1.0$   $^{\circ}\text{C}/10$  лет), а тенденцию к увеличению площади в 2005–2015 гг. – наоборот, некоторым замедлением потепления

в сезон аблации (особенно в мае, июле и сентябре) и небольшим увеличением осадков (до 1% за 10 лет) в сезон аккумуляции.

Если сравнить тренды температуры воздуха и атмосферных осадков для ледников в горах Бырранга (Ананичева, Корнева, 2024) и Кузнецкого Алатау в среднем за 1975–2021 гг., то для осадков

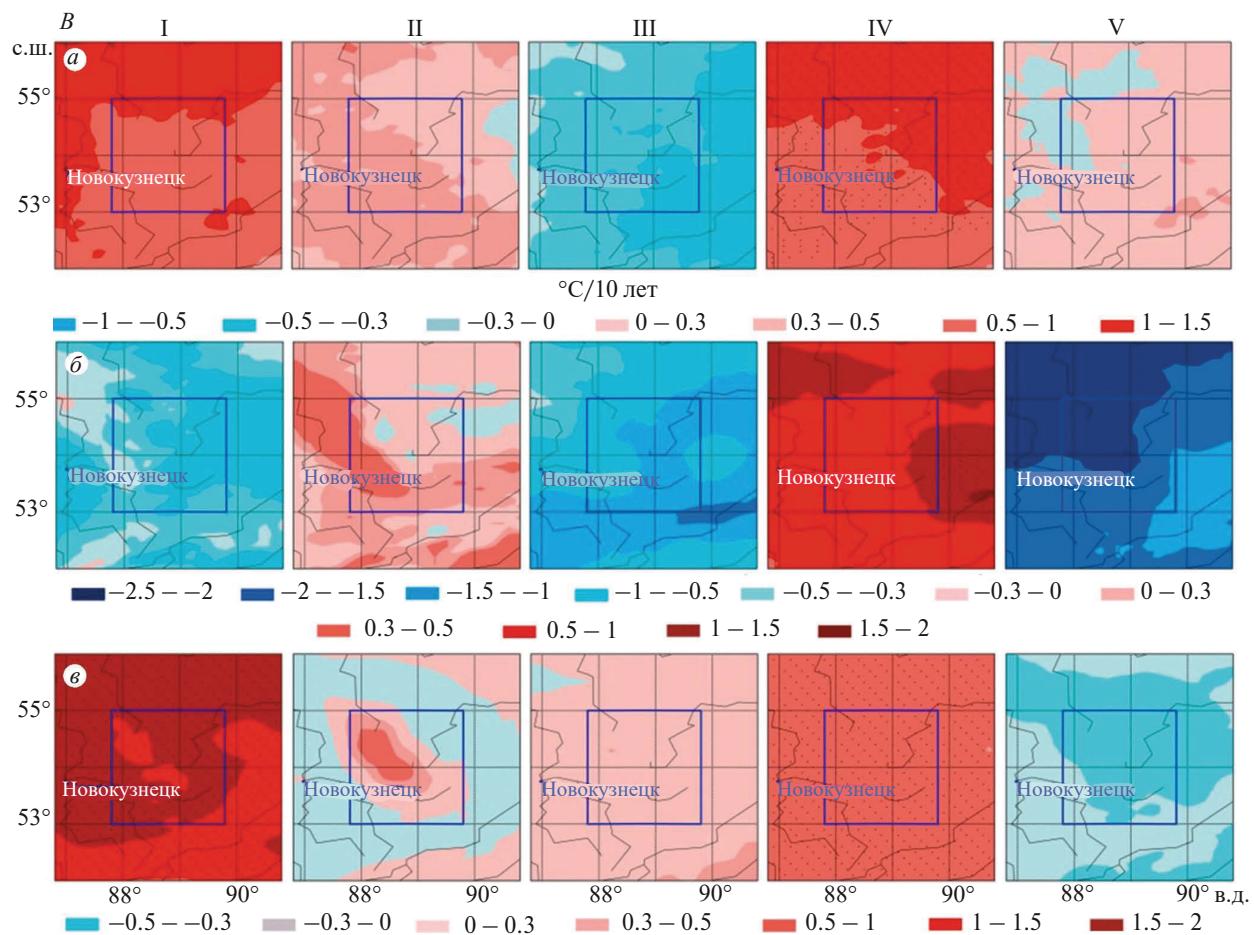


Рис. 5. Окончание

Fig. 5. The end

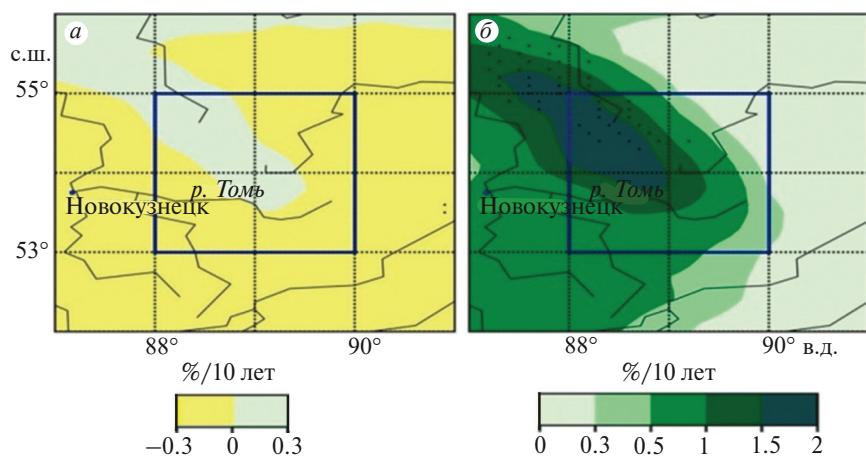


Рис. 6. Тренды общего количества осадков (%/10 лет) за сезон аккумуляции за 1975–2004 гг. (а) и 2005–2015 гг. (б). Область расположения ледников Кузнецкого Алатау обозначена прямоугольником. Чёрными точками показаны ячейки, где тренд значим на 5%-м уровне статистической значимости

Fig. 6. Trends in total precipitation (%/10 years) during accumulation seasons of 1975–2004 (a) and 2005–2015 (б). The area of the Kuznetsky Alatau glaciers is indicated by a rectangle. Black dots indicate cells where the trend is significant at the 5% level of statistical significance

холодного периода тенденции в целом схожи — в обоих районах наблюдается их небольшое статистически незначимое увеличение, чуть более сильное в горах Бырранга. А скорости роста летней температуры различаются существенно: в районе ледников Кузнецкого Алатау это 0.3–0.5 °C/10 лет, а в районе ледников гор Бырранга это значительно больше: 1.0–1.2 °C/10 лет.

### СРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ С ДИНАМИКОЙ ОЛЕДЕНЕНИЯ ГОР БЫРРАНГА И ХРЕБТОВ ВОКРУГ БАЙКАЛА

Климатические условия в северной (горы Бырранга), юго-западной (Кузнецкий Алатау) и юго-восточной (Прибайкалье) областях заметно отличаются (см. рис. 1). Среднегодовые температуры значительно ниже на севере, а количество осадков, наоборот, максимально в районе Кузнецкого Алатау. Здесь за период 1967–2023 гг. изменения  $T_{\text{sum}}$  и  $T_{\text{year}}$  по метеорологическим наблюдениям составляют около 2 °C, а изменения осадков почти нулевые. Осадки в высокогорье Бырранга высокие, изменения  $T_{\text{year}}$  наибольшие (до 4 °C за 1966–2023 гг.),  $T_{\text{sum}}$  меньше, тренды осадков отрицательны. В Прибайкалье тренд  $T_{\text{sum}}$  начиная с 1980-х годов всюду положительный и достигает 3 °C за 40 лет,  $T_{\text{year}}$  с 1966 по 2020 г. всего ~1.5 °C, осадки в целом остаются без изменений (Ананичева и др., 2022; Ананичева, Корнева, 2024).

Структура оледенения в этих районах также различается: в Прибайкалье описано 10 ледников, существующих изолированно на большом расстоянии друг от друга (Ананичева и др., 2022), в Кузнецком Алатау можно выделить два района

распространения оледенения — центральный и южный, где описано 78 ледников (Ananicheva et al., 2025). Анализ снимков Sentinel-2 региона гор Бырранга в августе 2022 г. выявил 210 ледников общей площадью 24.7 км<sup>2</sup> (Ананичева, Корнева, 2024).

Оценка числа ледников, относящихся к различным морфологическим типам и экспозиции, показала, что преобладание каровых ледников на склонах восточной, северной и северо-восточной экспозиций характерно для всех трёх систем. Для Кузнецкого Алатау наиболее характерны прислоновые и висячие ледники, а южные склоны практически свободны от ледников. Есть и различия: для гор Бырранга характерно преобладание каровых и долинных типов, есть перемётные ледники, а в Кузнецком Алатау преобладают прислоновые и висячие ледники, так как здесь много крутых склонов.

В упомянутых выше статьях делались оценки изменений площадей, высот ледников гор Бырранга и хребтов Прибайкалья. Стого сравнить сокращения площадей трудно, поскольку сравнение велось с данными соответствующих каталогов, они составлялись в разные годы. В табл. 3 приведены осреднённые (изначально расчёт вёлся по ледниковым бассейнам) значения разницы (D, %) между данными каталогов ледников этих горных систем и снимками Sentinel-2.

Из табл. 3 видно, что больше всего сократилась площадь ледников в Кузнецком Алатау; большинство ледников здесь относится к прислоновым, площадью до 0.3 км<sup>2</sup>. Они существуют в основном за счёт высоких сумм твёрдых осадков и ветрового переноса снега. Выживанию таких малых форм оледенения способствует также затененное положение в карах и на склонах.

**Таблица 3.** Сокращение площади ледников: каталог–снимки 2022/23 г. ( $D_{\text{cat-sentinel-2}}$ , %) для трёх ледниковых систем: горы Бырранга, Байкальский регион, Кузнецкий Алатау

**Table 3.** Glacier area reduction: catalog vs. 2022/23 imagery comparison ( $D_{\text{cat-sentinel-2}}$ , %) for three glacial systems: Buryranga Mts, Baikal region, Kuznetsky Alatau

Регион	Превалирующий морфологический тип и экспозиция	Даты составления каталога и даты определения по Sentinel-2	$D_{\text{cat-sentinel-2}}$ , %
Горы Бырранга	Карово-висячий, каровый, прислоновый, С, СВ и В	1967–2022	41.0
Байкальский регион	Каровый, В и ЮВ	2000/23	45.5
Кузнецкий Алатау	Прислоновый, В и СВ	(1975–1980) – 2023	64.5

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

Поскольку в настоящее время в Кузнецком Алатау залегают лишь малые ледники, большое значение имеет точность измерения их площадей и высот по снимкам. Погрешность определения положения границы льда устанавливается во многом разрешением снимка. Для спутниковых систем, использованных в данном исследовании, разрешение составляет 2–10 м/пиксель, разрешение ортофотопланов, построенных по данным БПЛА, составляет 0.15 м/пиксель. Площади контуров на снимках Sentinel-2 сравнивали со съёмкой БПЛА, полученных на ту же дату в 2022 г. для двух ледников – Карагаташ и Тронова. Сравнение контуров показало одинаковую площадь. Как было сказано выше, размеры ледников Кузнецкого Алатау изменчивы от года к году (в зависимости, в основном, от приходящих осадков и ветрового переноса снега), это наглядно демонстрирует сравнение значений площадей за период 2022–2023 г. Для ледника Карагаташ в 2021 г. площадь отличалась от 2022 г. лишь на 1%, а в 2023 г. на 14%, причём в 2023 г. площадь ледника выросла. Для ледника Тронова расхождения в площади в 2021 г. по сравнению с 2022 г. были значительные – до 20%, а в 2023 г. – 11% (в 2023 г. ледник также несколько увеличил площадь).

Стабилизация отступания или роста некоторых ледников в горах Кузнецкого Алатау с 2005 г. согласуется с данными для соседних горных районов Внутренней Азии. К.В. Чистяков, Д.А. Ганюшкин и Ю.Н. Курочкин (2015) отметили замедление отступания ледников в Монгун-Тайгинском и Таван-Богдо-Олинском массивах после 2007 г. Они отмечают, что в 2009–2015 гг. общая площадь ледников в массиве Таван-Богдо-Ола уменьшилась на 0.6%, темпы сокращения составили около 0.1% в год, тогда как в 2002–2009 гг. они достигали 1.3% в год. В то же время имеется большое количество публикаций, которые свидетельствуют о современном отступании ледников в Горном Алтае (ближайшем к району исследований центре горного оледенения) и показывают увеличение темпов деградации ледников. Г.А. Носенко, С.А. Никитин, Т.Е. Хромова (2014) на основании сравнения космических снимков 2004 и 2012 гг. с данными середины прошлого века сделали вывод, что за последнее десятилетие скорость отступания ледников в Горном Алтае увеличилась почти вдвое. А.А. Коломийцев и др. (2016) в июне 2016 г. измерили высоту поверхности ледника Томич (Западно-Катунский центр оледенения, Горный Алтай). Их измерения показали, что фронт ледника с 1969 по 2009 г. отступил на 136 м,

с 2009 по 2014 г. – на 58 м, т.е. интенсивность отступания увеличилась вдвое. Такая асинхронная динамика ледников на соседних территориях в пределах одной Алтай-Саянской горной страны требует тщательного анализа. Мы полагаем, что ледники на периферии Алтай-Саянской горной страны в условиях современных климатических изменений находились в более благоприятных условиях, чем ледники во внутренних регионах. Возможно, сохранению ледников способствует рельеф гор Кузнецкого Алатау с распространением широких плоских водоразделов. Такие водоразделы зимой выступают в роли областей дефляции снега (выноса ветром). В таких условиях все отрицательные формы рельефа на подветренных склонах (включая понижения, развитые ледниками) заполняются снегом до высоты общего уклона склона. Многолетнее накопление снега здесь значительно превышает климатическую норму. Кроме того, мелкие ледники исследуемого региона имеют малое запаздывание реакции (около 2–3 лет) и поэтому реагируют на переход в fazu прохладно-влажного климата гораздо быстрее, чем крупные долинные ледники. Оценивая изменчивость малых ледников Кузнецкого Алатау во временных интервалах, коррелирующих с инерцией их оледенения (2–3 года), можно выявить мелкоперiodные климатические циклы изменения снежного покрова региона. Для регионов Кузбасса и Хакасии горы Кузнецкого Алатау являются ключевыми.

Авторы работы признают, что вопрос о том, являются ли континентальные малые ледники более устойчивыми или более чувствительными к изменению климата, всё ещё остаётся довольно спорным, но может быть решён путём сбора и анализа новых данных, а потому остаётся актуальным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование динамики ледников Кузнецкого Алатау, Прибайкалья и гор Бирранга позволило получить следующие ключевые результаты, отвечающие на вопросы, поставленные во введении.

На основе анализа спутниковых снимков Sentinel-2 (2021–2023 гг.) выявлено, что площадь ледников Кузнецкого Алатау сократилась на 50–75% с 1980 г. В регионе идентифицировано 78 ледников и 57 снежно-ледовых образований, при этом наибольшие потери характерны для присклоновых ледников. Морфологически в настоящее время выделяются присклоновые и каровые ледники и переходные между ними формы. Эти данные согласуются с тенденциями, наблюдаемыми в других

регионах Центральной Сибири, таких как Прибайкалье и горы Бырранга.

Использование данных реанализа ERA5-Land и метеостанций показало, что сокращение ледников связано с ростом летних температур (особенно в мае и августе) и изменением режима осадков. В период 2005–2015 гг. отмечалось замедление деградации ледников, что объясняется снижением темпов потепления и увеличением зимних осадков. Однако с 2015 г. тенденция к сокращению площади возобновилась.

Ледники Кузнецкого Алатау демонстрируют более высокую чувствительность к климатическим изменениям по сравнению с ледниками гор Бырранга и Прибайкалья, что обусловлено их малыми размерами и низким высотным положением. При этом морфологические положение (каровые или присклоновые) и экспозиция играют ключевую роль в их устойчивости к изменениям климата.

Уточнение границ ледников и снежно-ледниковых образований с использованием современных спутниковых данных и полевых исследований подтвердило необходимость унификации методов мониторинга для корректного сравнения динамики оледенения в разных регионах. Верификация данных снимков Sentinel-2 с помощью съёмки БПЛА показала высокую точность определения параметров ледников.

Полученные результаты важны для оценки водных ресурсов и прогнозирования природных рисков в горных регионах Центральной Сибири. Они также вносят вклад в обновление каталога “Ледники России”, предоставляя актуальные данные о площадях, высотах и других параметрах ледников.

Таким образом, исследование подтвердило значительное влияние климатических изменений на малые формы оледенения Кузнецкого Алатау и выявило региональные особенности их динамики. Для дальнейшего понимания этих процессов необходимы продолжение мониторинга и интеграция данных дистанционного зондирования с полевыми наблюдениями.

**Благодарности.** Работа сделана при поддержке гранта РНФ № 24-27-00310. Мы также благодарны сотрудникам заповедника “Кузнецкий Алатау”.

**Acknowledgements.** The work was done with the support of the Russian Science Foundation Grant No. 24-27-00310. We are also grateful to the staff of the “Kuznetsky Alatau” Nature Reserve.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адаменко М.М., Гутак Я.М. (а) Новый подход к дифференциации малых ледников и многолетних снежников на основе длительности непрерывного существования гляциально-нивального объекта (на примере гор Кузнецкого Алатау) // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 33–40.
- Адаменко М.М., Гутак Я.М., Антонова В.А. (б) Изменение климата и размеров ледников в горах Кузнецкого Алатау в 1975–2015 гг. // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 334–342.
- Адаменко М.М., Гутак Я.М., Треньков И.П. Изменения внутригодового распределения осадков и динамика снежности в горах Кузнецкого Алатау // Геосферные исследования. 2021. № 2. С. 101–109.
- Ананичева М.Д., Абрамов А.А., Кононов Ю.М., Патрикевича И.А., Пакин Г.Ю. Особенности оледенения северного Прибайкалья в начале XXI века // Криосфера земли. 2022. Т. XXVI. № 6. С. 59–70.
- Ананичева М.Д., Корнева И.А. Малые формы оледенения и климатические особенности Таймыра: новые оценки // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 3. С. 345–357.
- Ананичева М.Д., Кононов Ю.М. Изменения ледников Корякского нагорья в период с 1972 по 2019 г. // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 72–88. <https://doi.org/10.17223/25421379/35/6>
- Каталог ледников СССР. Т. 15. Вып. 2. Ч. 1. Бассейны рек Томи и Чулымка (Кузнецкий Алатау). М.; Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 43 с.
- Коваленко Н.В. Современное состояние малых ледников Кузнецкого Алатау и Плато Путорана // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 67–71.
- Коваленко Н.В., Поповнин В.В., Губанов А.С., Поляхов А.А., Успенская Е.И. Малые ледники плато Путорана на фоне климатических перемен // Лёд и Снег. 2023. № 63 (3). С. 332–346.
- Коломийцев А.А., Мардасова Е.В., Рудыка Р.А., Шереметов Р.Т. Экспертная оценка потери вещества ледником Томич (Западно-Катунский центр оледенения, Алтай) за период с 2010 по 2016 годы // Известия Алтайского отдела РГО. 2016. № 3. С. 42.
- Носенко Г.А., Никитин С.А., Хромова Т.Э. Изменения площади и объема ледников Горного Алтая (Россия) с серединой XX века по данным космической съёмки // Лёд и Снег. 2014. № 2. С. 5–13. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-5-13>
- Сюбаев А.А., Ковалев Е.А. Современное состояние оледенения Кузнецкого Алатау и его динамика во второй половине XX века // Природа и экономика Кузбасса: Региональный сборник научных статей. Новокузнецк: КузГПА. 2004. Вып. 9. Т. 2. С. 41–49.
- Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Курочкин Ю.Н. Современное состояние и динамика гляциально-нивальных

- систем массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола // Лёд и Снег. 2015. № 1 (129). С. 49–60.
- Чураков А.Н. Кузнецкий Алатау // Очерки по геологии Сибири. М.: Изд-во АН СССР. 1932. С. 1–115.
- Шереметова С.А., Шереметов Р.Т. Основные климатические параметры зимнего сезона и особенности биологического спектра флоры сосудистых растений бассейна р. Томь // Сибирский экологический журнал. 2015. Т. 22. № 1. С. 3–12.
- Шпинь П.С. О снежном покрове и количестве осадков в южной части Кузнецкого Алатау // Гляциоклиматология Западной Сибири. 1975. Л.: Географическое общество СССР. С. 74–88.
- Шпинь П.С. Оледенение Кузнецкого Алатау. М.: Наука, 1980. 83 с.
- Ananicheva M., Adamenko M., Abramov A. Glaciation in the Kuznetsky Alatau Mountains – Dynamics and Current State According to Sentinel-2 Satellite Images and Field Studies. // Glaciers 2025. № 2 (3). 9 p. <https://doi.org/10.3390/glaciers2030009>
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of Russian Glaciers Based on Satellite Data (2016–2019) // Water Resources. 2022. № 49. Р. 55–68. <https://doi.org/10.1134/S0097807822070065>
- Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010. 15 p.
- Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20<sup>th</sup> century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model. // Journ. of Geophys. Research: Atmospheres. 2010. V. 115 (D16). P. D16107. <https://doi.org/10.1029/2009JD012976>
- OpenTopography // Электронный ресурс. <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3> Дата обращения: 19.06.25.

**Citation:** Ananicheva M.D., Abramov A.A., Adamenko M.M., Korneva I.A. Glacier Dynamics in the Kuznetsky Alatau and other regions of Central Siberia Under Climate Change. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (4): 540–556. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040028.

## Glacier Dynamics in the Kuznetsky Alatau and other regions of Central Siberia under climate change

© 2025 M. D. Ananicheva<sup>a, #</sup>, A. A. Abramov<sup>a</sup>, M. M. Adamenko<sup>b</sup>, I. A. Korneva<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Siberian Industrial University, Novokuznetsk, Russia*

<sup>c</sup>*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia*

#e-mail: maranan@gmail.com

Received June 19, 2025; revised August 14, 2025; accepted September 25, 2025

The mountain ranges surrounding the Central Siberian Plateau host predominantly small-scale glaciation, including minor glaciers and snow-ice formations (SIFs). This study presents updated glacial extent mapping using Sentinel-2 imagery for three regions: the Kuznetsky Alatau (current focus), Baikal Ranges (Baikalsky, Barguzin, and Verkhneangarsky ridges), and Byrranga Mountains (Taimyr). Since the 1960s (Byrranga/Baikal) and 1980s (Kuznetsky Alatau), these regions have experienced 50–75 % ice loss, strongly correlated with climatic shifts. In the Kuznetsky Alatau (glaciers located at 1.200–1.500 m asl), August 2021/23 Sentinel-2 imagery revealed 78 glaciers (53 previously cataloged in the USSR Glacier Inventory) and 57 SIFs. Slope-attached glaciers showed the most pronounced retreat, followed by cirque types. Satellite-derived parameters were field-verified during August 2024 expeditions. Key characteristics of Kuznetsky Alatau's cryospheric features include: minimal dimensions, low median elevation, and high meteorological sensitivity (winter precipitation, summer temperatures, wind regimes). Interannual variability reveals both negative mass balance (warming/reduced snowfall) and episodic gains (wind-driven snow redistribution, avalanche deposition, or cooler summers). Using archived Corona (1960) and Hexagon (1973) images, we evaluated discrepancies between the USSR Glacier Inventory (1970s) and satellite-derived glacier areas/altitudes for two glacial clusters in Kuznetsky Alatau. Glacier-climate relationships were quantified using ERA5-Land reanalysis data (temperature/precipitation trends), with comparative analysis against Byrranga and Baikal regions.

**Keywords:** Kuznetsky Alatau, Central Siberia, glacier, glacier area, satellite image, climate change, temperature, precipitation, ERA5-Land

## REFERENCES

- Adamenko M.M., Gutak Ya.M. (a) A New Approach to Differentiating Small Glaciers and Perennial Snowpatches Based on the Duration of Continuous Existence of Glacio-Nival Objects (Case Study of the Kuznetsky Alatau Mountains). *Geosfernye Issledovaniya*. Geospheric Research. 2017, 3: 33–40. [In Russian].
- Adamenko M.M., Gutak Ya.M., Antonova V.A. (b) Climate Change and Glacier Size Variations in the Kuznetsky Alatau Mountains from 1975 to 2015. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (3): 334–342. [In Russian].
- Adamenko M.M., Gutak Ya.M., Tren'kov I.P. Changes in Intra-Annual Precipitation Distribution and Snow Cover Dynamics in the Kuznetsky Alatau Mountains. *Geosfernye Issledovaniya*. Geospheric Research. 2021, 2: 101–109. [In Russian].
- Ananicheva M.D., Korneva I.A. Small Forms of Glaciation and Climatic Features of Taimyr: New Estimates. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (3): 345–357 [In Russian].
- Ananicheva M.D., Kononov Yu.M. Glacier Changes in the Koryak Highlands from 1972 to 2019. *Geosfernye Issledovaniya*. Geosphere Research. 2025, 2: 72–88. <https://doi.org/10.17223/25421379/35/6> [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. Tom 15, Vypusk 2, Chast' 1. Basseyny rek Tomi i Chulyma (Kuznetskiy Alatau). USSR Glacier Catalog. V. 15, Is. 2, Part 1. Basins of the Tom and Chulym Rivers (Kuznetsky Alatau). Moscow-Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 43 p. [In Russian].
- Kovalenko N.V. The current state of the small glaciers of the Kuznetsky Alatau and the Putorana Plateau. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5: Geografiya*. Moscow University Bulletin. Series 5: Geography. 2008, 3: 67–71. [In Russian].
- Kovalenko N.V., Popovnin V.V., Gubanov A.S., Polyukhov A.A., Uspenskaya E.I. Small Glaciers of the Putorana Plateau in the Context of Climate Change. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3): 332–346. [In Russian].
- Kolomytsov A.A., Mardasova E.V., Rudyka R.A., Sheremetov R.T. Expert Assessment of Mass Loss by the Tomich Glacier (West Katun Glacial Center, Altai) from 2010 to 2016. *Izvestiya Altayskogo Otdeleniya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva*. Proceedings of the Altai Branch of the Russian Geographical Society. 2016, 3: 42. [In Russian].
- Nosenko G.A., Nikitin S.A., Khromova T.E. Glacier Area and Volume Changes in the Altai Mountains (Russia) since the Mid-20th Century Based on Satellite Imagery. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2014, 2: 5–13. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-5-13> [In Russian].
- Syubaev A.A., Kovalev E.A. Current State of Glaciation in the Kuznetsky Alatau and Its Dynamics in the Second Half of the 20<sup>th</sup> Century. *Priroda i ekonomika Kuzbassa: Regional'nyy sbornik nauchnykh statey*. Nature and Economy of Kuzbass: Regional Collection of Scientific Articles. KuzGPA. 2004, 9 (2): 49. [In Russian].
- Chistyakov K.V., Ganyushkin D.A., Kurochkin Yu.N. Current State and Dynamics of Glacio-Nival Systems in the Mongun-Taiga and Tavan-Bogdo-Ola Massifs. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2015, 129 (1): 49–60. [In Russian].
- Churakov A.N. Kuznetsky Alatau. *Ocherki po geologii Sibiri*. Essays on the Geology of Siberia. Moscow: USSR Academy of Sciences. 1932: 1–115. [In Russian].
- Sheremetova S.A., Sheremetov R.T. Key Climatic Parameters of the Winter Season and Features of the Biological Spectrum of Vascular Plant Flora in the Tom River Basin. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal*. Siberian Journal of Ecology. 2015, 22 (1): 3–12. [In Russian].
- Shpin' P.S. Snow Cover and Precipitation Amount in the Southern Part of the Kuznetsky Alatau. *Glyatsioklimatologiya Zapadnoy Sibiri*. Glacioclimatology of Western Siberia. Leningrad, 1975: 74–88. [In Russian].
- Shpin' P.S. Oledenenie Kuznetskogo Alatau. Glaciation of the Kuznetsky Alatau. Moscow: Nauka, 1980: 83 p. [In Russian].
- Ananicheva M., Adamenko M., Abramov A. Glaciation in the Kuznetsky Alatau Mountains – Dynamics and Current State According to Sentinel-2 Satellite Images and Field Studies. *Glaciers* 2025, 2 (3): 9 p. <https://doi.org/10.3390/glaciers2030009>
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of Russian Glaciers Based on Satellite Data (2016–2019). *Water Resources*. 2022, 49: 55–68. <https://doi.org/10.1134/S0097807822070065>
- Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15.
- Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraev A. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20<sup>th</sup> century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2010, 115 (D16): D16107 p. <https://doi.org/10.1029/2009JD012976>
- OpenTopography Retrieved from: URL: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoid=OTS-DEM.032021.4326.3> (Last access: June 19, 2025).