

А. Д. Китов<sup>1</sup>, В. М. Плюснин<sup>2</sup>

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ОТДЕЛЬНЫХ ЛЕДНИКОВ ШИРОТНОГО ТРАНСЕКТА (КОДАР–ГИМАЛАИ)

### АННОТАЦИЯ

Дистанционные данные Landsat позволяют с периодичностью до 5 лет анализировать состояние нивально-гляциальных объектов в различных районах современного оледенения. Одним из показательных и хорошо дешифрируемых характеристик таких объектов является открытая площадь ледника. Рассматриваемый широтный трансект от северных районов оледенения Южной Сибири до Гималаев позволяет в таком ракурсе с пятилетней периодичностью представить динамику ледников на примере отдельных ледников ключевых районов. Вдоль трансекта показана динамика ледников в горах: Кодар, Баргузинский хребет, Байкальский хребет, Восточный Саян (массивы пика Топографов и Мунку-Сардык), Монгольский Алтай, Тянь-Шань, Гималаи. Дан анализ изменения открытой части ледников некоторых представителей этих гор. На протяжении трансекта ледники сокращаются, но в разной степени. Наблюдается сокращение ледников и повышение интенсивности бронирования поверхностными моренами в большей степени в северной части трансекта. По данным дистанционного зондирования Земли (Landsat) выполнено сравнение динамики выбранных ледников Азаровой (№ 20, Кодар), Урёл-Амутис (Баргузинский хребет), Черского (Байкальский хребет), Перетолчина (№ 31, Мунку-Сардык), Топографов (№ 18, Окинский хребет), Цаст-Ула (№ 8, Цамбагарав), Карлыктаг (Тянь-Шань), Алтынтаг (№ 3, Куньлунь) и Юбра (№ 30, Лангтанг). С середины 1970-х, когда началась съемка спутником Landsat, до наших дней ледники сократились по площади от 17 до 63 %. Ледники северной части трансекта сокращаются более плавно по сравнению с южной. В южной части наблюдается сокращение и замедление, а иногда и увеличение открытой части ледников примерно с периодичностью 10 лет. Наиболее неравномерная динамика у Гималайского ледника. Скорость сокращения ледников уменьшается с юга к северу трансекта. Ледник Азаровой сокращается со скоростью 0,007 км<sup>2</sup>/год, Урёл-Амутис — 0,005, Черского — 0,002, Перетолчина — 0,012, Топографов — 0,002, Цаст-Ула — 0,056, Алтынтаг — 0,013, Карлыктаг — 0,07, Юбра — 0,085.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ГИС, данные Landsat, ледник, дистанционные исследования, трансект

---

<sup>1</sup> Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, e-mail: [kitov@irigs.irk.ru](mailto:kitov@irigs.irk.ru)

<sup>2</sup> Институт географии имени В. Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, e-mail: [plyusnin@irigs.irk.ru](mailto:plyusnin@irigs.irk.ru)

Aleksandr D. Kitov<sup>1</sup>, Viktor M. Plyusnin<sup>2</sup>

## COMPARATIVE DYNAMICS OF INDIVIDUAL GLACIERS OF THE LATITUDINAL TRANSECT (KODAR–HIMALAYAS)

### ABSTRACT

Landsat remote sensing data make it possible to analyze the state of nival-glacial objects in various areas of modern glaciation with a periodicity of up to 5 years. One of the indicative and well-decipherable characteristics of such objects is the open area of the glacier. The latitudinal transect from the northern glaciation regions of Southern Siberia to the Himalayas makes it possible to present the dynamics of glaciers on the example of individual glaciers of key regions from this perspective with a five-year periodicity. Along the transect, the dynamics of glaciers in the mountains is shown: Kodar, Barguzinsky Range, Baikal Range, Eastern Sayan (Topografov Peak and Munku-Sardyk massifs), Mongolian Altai, Tien Shan, Himalayas. An analysis of changes in the open part of the glaciers of some representatives of these mountains is given. Throughout the transect, glaciers shrink, but to varying degrees. There is a decrease in glaciers and an increase in the intensity of surface moraine armor to a greater extent in the northern part of the transect. Based on the data of remote sensing of the Earth (Landsat), a comparison of the dynamics of the selected glaciers Azarova (No. 20, Kodar), Urel-Amutis (Barguzinsky Ridge), Chersky (Baikal Range), Peretolchina (No. 31, Munku-Sardyk), Topografov (No. 18, Okinsky Ridge), Tsast-Ula (No. 8, Tsambagarav), Karlygtag (Tien Shan), Altyntag (No. 3, Kunlun) and Yubra (No. 30, Langtang) was carried out. From the mid-1970s, when Landsat imagery began, to the present day, glaciers have shrunk in area from 17 to 63 percent. The glaciers of the northern part of the transect are shrinking more smoothly compared to the southern part. In the southern part, there is a reduction and slowdown, and sometimes an increase in the open part of the glaciers with a periodicity of about 10 years. The Himalayan glacier has the most uneven dynamics. The rate of glacier shrinkage decreases from south to north of the transect. The Azarova glacier is shrinking at a rate of 0.007 km<sup>2</sup>/year, the Urel-Amutis glacier is shrinking at a rate of 0.005, the Chersky glacier is shrinking at a rate of 0.002, the Peretolchina glacier is shrinking at a rate of 0.012, the Topografov glacier is shrinking at a rate of 0.002, the Tsast-Ula glacier is shrinking at a rate of 0.056, the Altyntag glacier is shrinking at a rate of 0.013, the Karlyktag glacier is shrinking at a rate of 0.07, and the Yubra glacier is shrinking at a rate of 0.085.

**KEYWORDS:** GIS, Landsat data, glacier, remote sensing, transect

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата находит отражение в динамике внутриконтинентальных горных ледников [IPCC, 2007, 2021]. В результате потепления происходит сокращение ледников. Однако локальные условия влияют на их динамику. Представляет интерес проследить реакцию различных ледников на значительном широтном пространстве. Нами рассматривается динамика ледников в пределах трансекта от хребта Кодар до Гималаев по данным Landsat [Kitov и др., 2019]. Анализ этих данных показал, что в отдельные периоды можно отслеживать изменения ледников ежегодно. Однако наиболее уверенно можно проследить такие изменения с периодичностью 5–10 лет. Такая регулярная инвентаризация ледников с применением программных комплексов ГИС позволит дополнить электронные

<sup>1</sup> V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: [kitov@irigs.irk.ru](mailto:kitov@irigs.irk.ru)

<sup>2</sup> V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: [plyusnin@irigs.irk.ru](mailto:plyusnin@irigs.irk.ru)

каталоги и базы данных (БД) ледников [Gao, Liu, 2001; Owen et al., 2009; RGI Consortium, 2017]. В архиве Геологической службы США в открытом доступе можно найти спутниковые данные Landsat с 1970-х гг. по настоящее время. На этих снимках хорошо дешифрируется открытая часть (площадь) даже небольших ледников [Руководство, 1967]. Именно эта часть ледника представляется наиболее чувствительным показателем его изменения. В данной работе рассматривается динамика ледников по названной характеристике с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с периодичностью около 5 лет. Начальным состоянием будем считать площадь ледника по топографическим картам 1960-х (если такую удавалось найти). За опорные годы были взяты соответственно 1960, 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 и 2023 гг. Если данных конкретного года не находилось, то использовались данные ближайших лет (годом раньше или позже).

В качестве сравниваемых объектов на ключевых участках (горных хребтов) выбраны ледники: Азаровой (№ 20, Кодар), Урёл-Амутис (Баргузинский хребет), Черского (Байкальский хребет), Перетолчина (№ 31, Мунку-Сардык, Восточный Саян), Топографов (№ 18, Окинский хребет, Восточный Саян), Цаст-Ула (№ 8, Цамбагарав, Монгольский Алтай), Карлыктаг (Восточный Тянь-Шань), Алтынтаг (№ 3, Куньлунь) и Юбра (№ 30 Лангтанг) (рис. 1).

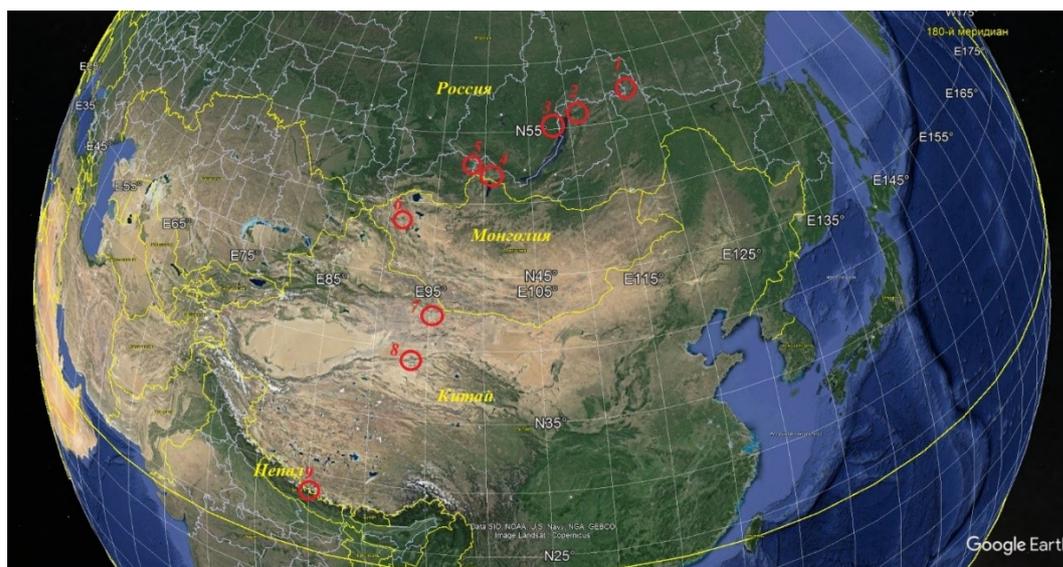


Рис. 1. Ключевые участки трансекта: 1 — Хребет Кодар; 2 — Баргузинский хребет; 3 — Байкальский хребет; 4 — хребет Мунку-Сардык; 5 — Окинский хребет; 6 — Цаст-Ула; 7 — Карлыктаг; 8 — Куньлунь; 9 — Лангтанг  
Fig. 1. Key sections of the transect: 1 — Kodar Ridge; 2 — Barguzinsky Ridge; 3 — Baikal Range; 4 — Munku-Sardyk ridge; 5 — Oka Ridge; 6 — Tsast-Ula; 7 — Karlyktag; 8 — Kunlun; 9 — Langtang

В отдельные годы некоторые ледники трансекта исследовались, но не во взаимосвязи и не регулярно. Ледник Азаровой вошел в Каталог ледников СССР [1972] и исследовался в нашем столетии [Shahgedanova et al., 2011]. Ледники Баргузинского и Байкальского хребтов менее изучены [Котляков и др., 2017]. Ледники Восточного Саяна вошли в соответствующие каталоги [Каталог, 1973] и продолжают изучаться в настоящее время [Kitov et al., 2009; Осипов и др., 2017]. Ледники Монгольского Алтая исследовали по данным ДЗЗ Д. А. Ганюшкин и Д. Отгонбаяр [Отгонбаяр, 2011; Ганюшкин и др., 2016].

Ледники Гималаев исследуются активно особенно в районе Эвереста, но на территорию Лангтанг почти нет публикаций [Котляков и др., 2017; Китов и др., 2019; Wagnon et al., 2007; Bajracharya, Mool, 2009; Keiji Higuchi et al., 2015].

Целью исследования является сравнение динамики ледников вдоль названного трансекта. Представлена динамика ледников по площади их открытой части с учетом небольшой облачности, сезонной представительности ледников (на момент конца абляции) и с периодичностью около 5 лет.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Картографирование и отслеживание динамики ледников выполнялись по данным Landsat-2, -5, -7, -8, -9 с сайта Геологической службы США с 1972 по 2023 гг.<sup>1</sup> Использовались также топографические карты и международные базы данных GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), RGI (Randolph Glacier Inventory) и GAMDAM (Glacier Area Mapping for Discharge from the Asian Mountains) для сравнения с результатами аналогичных исследований. Список данных Landsat получился очень длинным. Наиболее продуктивным оказался спутник Landsat-5. Наименее удачными были 1980-е гг. Найти оптимальные снимки на период абляции для основной части ледников (с конца июля до середины августа каждого года) было легче для центрального участка трансекта. Для самых южных ледников (Гималаи) период безоблачного и оптимального определения границ ледников из-за муссонов смещается на середину октября и ноябрь. Для северных ледников (от Кодара до Восточных Саян) окно для получения оптимальных снимков сужается и приходится на первую декаду августа. Было исследовано 379 сцен данных Landsat, из них Landsat-5 — 107, Landsat-1-4 — 36, остальные 236 пришлись на Landsat-7-9.

Для улучшения видимости при дешифрировании использовались преобразования исходного растра типа Histogram equalize, Standard deviations, Gaussian и др. Но чаще всего использовалось преобразование Minimum-Maximum с небольшим увеличением яркости снимка.

Космические снимки были приведены к единой проекции WGS-84, UTM-зона 50 (Кодар), 49 (Баргузинский и Байкальский хребты), 47 (Восточный Саян), 46 (Монгольский Алтай, Восточный Тянь-Шань и Куньлунь), 45 (Лангтанг). Дешифрирование и векторизация границ объектов проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков (сцен), каналы 4-5-7 для Landsat-2, каналы 2-4-7 для Landsat-5 и -7 и 3-5-7 для Landsat-8 и -9 с улучшением до 15 м по каналу 8 (для Landsat-7-9). Это преобразование выполнялось в программе ENVI (Layer stacking, Gram-Schmidt Pan Sharpening). В некоторых случаях для уточнения границ ледника использовались и другие спектральные каналы данных Landsat. Измерения выполнялись в ГИС-программе ArcViewGIS 3.2a. При выделении границ ледника учитывались рекомендации по составлению каталогов ледников и Международного проекта GLIMS [Руководство, 1967; Rau et al., 2005; Hartman, 2006; Raup, Khalsa, 2010; Paul et al., 2017; RGI Consortium, 2017].

Погрешность определялась как произведение протяженности границы ледника (периметра) на разрешающую способность снимка. Ошибка  $dS$  в процентах определялась по формуле (1):

$$dS = Sp / S * 100 \quad (1),$$

где  $S$  — площадь ледника,

$Sp$  — площадь границы ледника с учетом размера пикселя.

<sup>1</sup> Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 10.02.2024)

Учитывая пространственное разрешение снимка Landsat-7–9 — 15 м/пикс., погрешность определения площади ледника оценивается в 10–35 % от измеряемой величины и используемых данных. Для снимков Landsat-2, -4 с разрешением 80 м/пикс. точность определения площади порядка 60 % (табл. 1).

Табл. 1. Оценка точности площади ледника Азаровой по разным данным  
Table 1. Estimation of the accuracy of the Azarova glacier area according to various data

Год	Площадь, км <sup>2</sup>	Периметр, км	Точность, км	Мин. площадь, км <sup>2</sup>	Площадь границы ледника, км <sup>2</sup>	Ошибка, %
1950	1,299	7,000	0,05	0,0025	0,350	26,9
1960	1,030	6,300	0,05	0,0025	0,315	30,6
1970	0,800	6,000	0,05	0,0025	0,300	37,5
1975	0,678	5,177	0,08	0,0064	0,414	61,1
1980	0,650	5,000	0,08	0,0064	0,400	61,5
1985	0,639	4,537	0,03	0,0009	0,136	21,3
1990	0,630	4,495	0,03	0,0009	0,135	21,4
1995	0,628	4,616	0,03	0,0009	0,138	22,0
2000	0,578	4,253	0,015	0,000225	0,064	11,0
2005	0,534	4,125	0,015	0,000225	0,062	11,6
2010	0,532	3,870	0,015	0,000225	0,058	10,9
2015	0,485	4,074	0,015	0,000225	0,061	12,6
2020	0,448	3,868	0,015	0,000225	0,058	12,9
2023	0,424	3,919	0,015	0,000225	0,059	13,9

Год — год получения данных; 1950–1970 гг. — использованы топокарты, 1975–1980 гг. — данные Ландсат-2–4, 1985–1995 гг. — Ландсат-5, 2000–2010 гг. — Ландсат-7, 2015–2023 гг. — Ландсат-8, -9; Мин. площадь — площадь условного пикселя, пояснение в тексте.

Картографические данные использовались как приблизительные для начальной ориентировки (отсчета). С одной стороны, не удалось найти топографические карты одинакового масштаба на все горные массивы, а на некоторые они вообще отсутствовали. С другой — на топокартах не отражаются основные составляющие ледников, да и аэроснимки чаще использовались не в период максимальной абляции конкретного ледника. На ледники Кодара, Байкальского и Баргузинского хребтов удалось скачать из интернета топокарты м-ба 1: 100 000, Восточного Саяна (Мунку-Сардык и Окинский хребет) — 1: 50 000, на Цаст-Ула и Карлыктаг карт не было, на Алтынтаг и Гималаи — 1: 200 000. Точность соответственно от 25 до 100 м. Условный пиксель (минимальная различимая площадь) порядка 0,000625, 0,0025 и 0,01 км<sup>2</sup>. Для ледника Азаровой по карте после оцифровки в ГИС площадь получилась 1,03 км<sup>2</sup>, периметр — 6,3 км, тогда площадь границы ледника —  $6,3 / 0,05 = 126$  пикселей,  $126 * 0,0025 = 0,315$  км<sup>2</sup>. В таком случае  $dS = 0,315 / 1,03 = 31$  %. По другим данным [Каталог, 1972] площадь составляла (вероятно, по аэроснимкам 1950-х) 1,3 км<sup>2</sup>.

Для российских ледников, если не было снимков на 1970 г., данные брались из каталога ледников СССР [Каталог, 1972, 1973] и соответствующих БД<sup>1</sup>. Для ледника

<sup>1</sup> Электронный ресурс: <https://www.glacru.ru/> (дата обращения 10.02.2024)

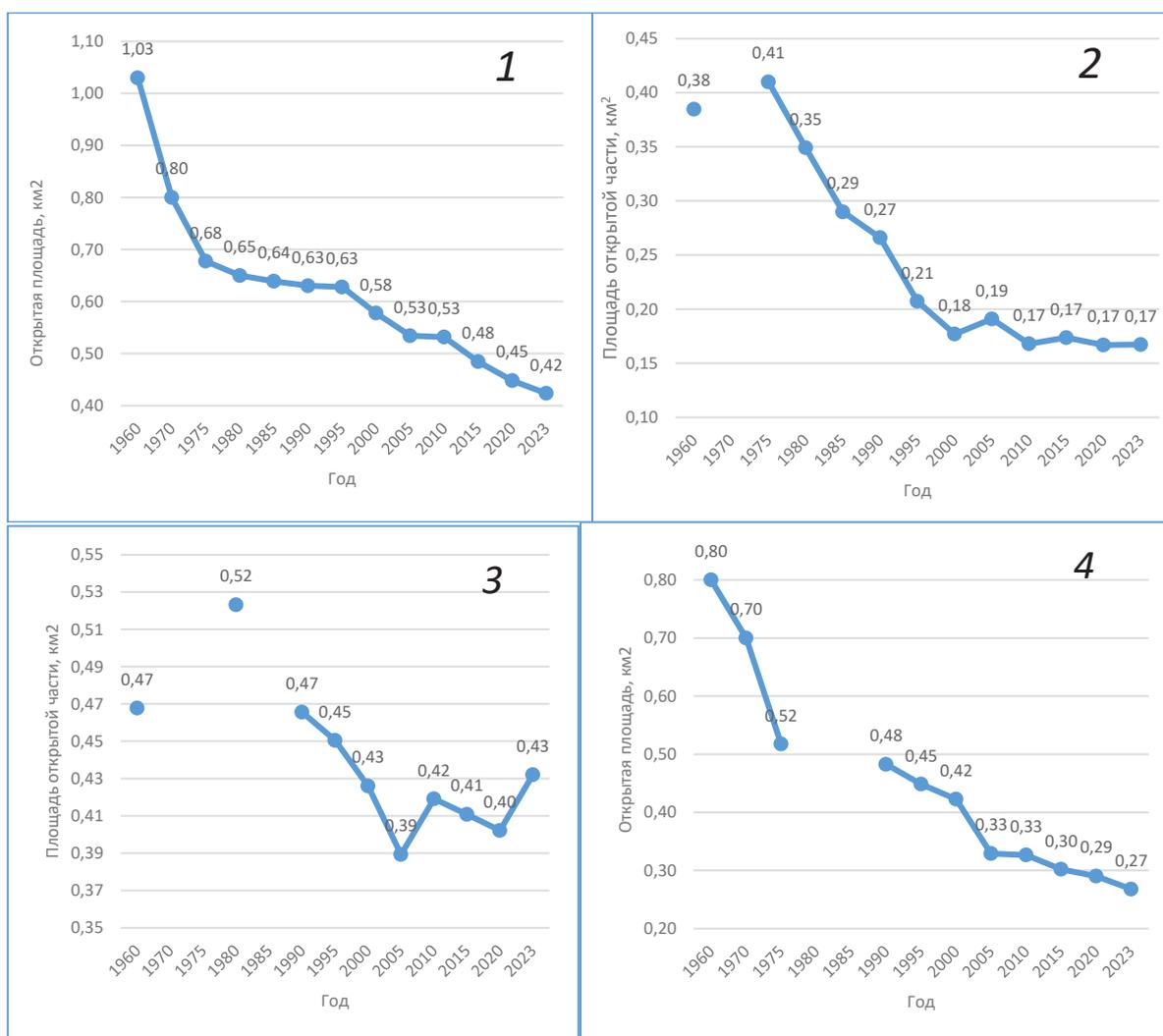
Азаровой в каталоге точность дана 0–5, для Перетолчина — 5–10, для Радде — 15–25, Топографов (№ 18) — 0–5 %.

Аналогичная точность получилась для ледников других горных районов. Поскольку для ледников Восточного Саяна использовались топокарты м-ба 1: 50 000, то ошибка определения площади получилась порядка 10–12 %, использование первых данных Landsat-1–4 дало наибольшую ошибку порядка 60 %, по данным Landsat-5 погрешность составила (для 1985–1995 гг.) 15–30 % для ледников в зависимости от соотношения площадь/периметр, а с 2000 г. при использовании данных Landsat-7-9 погрешность уменьшилась до 5–25 %. Чем меньше ледник, тем больше ошибка. Средние показатели погрешности по всем ледникам представлены на рис. 2(10).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате ГИС-анализа оценивалась площадь открытой части выбранных ледников в опорные годы с 1960 по 2023 гг. (рис. 2).

Между 1970-ми и 2000-ми гг. в Центральной Азии наблюдался отрицательный баланс массы ледников [WGMS, 2021], при этом отмечается общее отступление ледников за XX столетие с отдельными наступаниями около 1970-х гг. [Котляков и др., 2017; Su, Shi, 2002].



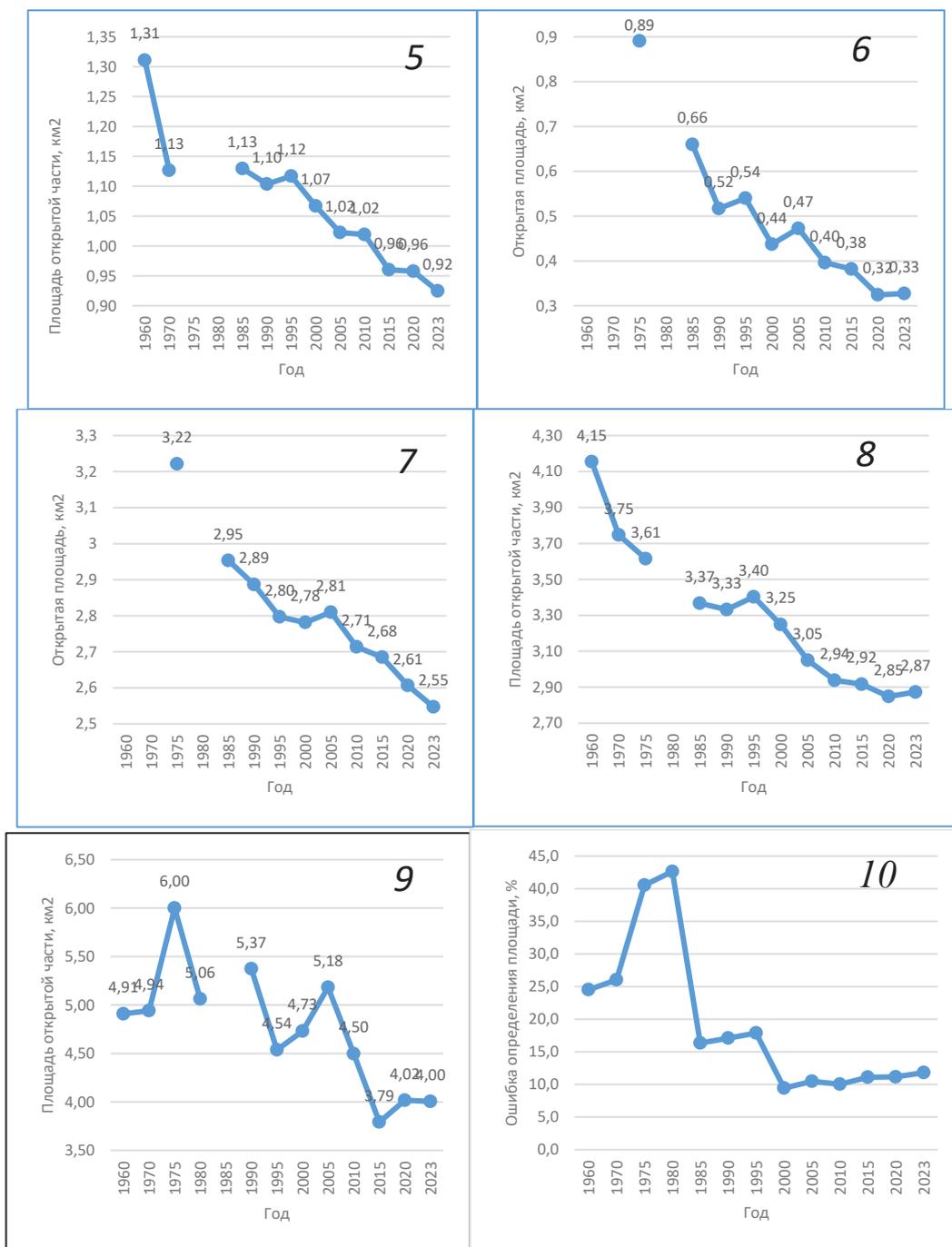


Рис. 2. Изменения открытой части ледников на ключевых участках: 1 — ледник Азаровой (Кодар); 2 — Урёл-Амутис (Баргузинский хребет); 3 — Черского (Байкальский хребет); 4 — Перетолчина (Мунку-Сардык); 5 — Топографов, № 18 (Окинский хребет); 6 — Цаст-Ула, № 8 (Цамбагарав); 7 — Карлыктаг (Тянь-Шань); 8 — Алтынтаг (Куньлунь); 9 — Юбра (Лангтанг, Гималаи); 10 — средняя ошибка определения площади ледника

Fig. 2. Changes in the open part of glaciers in key areas: 1 — Azarova glacier (Kodar); 2 — Urel-Amutis (Barguzin Range); 3 — Chersky (Baikal Range); 4 — Peretolchina (Munku-Sardyk); 5 — Topografov, No. 18 (Okinsky Ridge); 6 — Tsast-Ula, No. 8 (Tsambagarav); 7 — Karlyktag (Tien Shan); 8 — Altyntag (Kunlun); 9 — Yubra (Langtang, Himalayas); 10 — average error in determining the area of the glacier

Как видно из представленных данных, скорость сокращения площади открытой части ледников неравномерна, наблюдается периодичность (7–11 лет) замедления скорости сокращения и даже в некоторых случаях увеличение площади. Наиболее плавно и равномерно сокращался самый северный ледник Азаровой. Для этой территории удалось найти данные на все опорные годы. Хорошо просматривается замедление уменьшения ледника в 1970-е – 1990-е гг. Однако более южный Баргузинский ледник равномерно сокращался, а с 2000-х гг. — наоборот, начал замедляться в сокращении площади. К сожалению, не удалось найти данные на начальный период наблюдения. Данные топографических карт следует считать приблизительными, т. к. рисовка границ ледников на них довольно условная. Данные по Байкальскому хребту еще более фрагментарные. Как и большинство ледников, к 2005 г. ледник Черского сокращался сильнее, чем в настоящее время. Ледники Мунку-Сардык и в т. ч. ледник Перетолчина наиболее изучены. Наблюдение за этим ледником ведется с конца 1890-х гг. [Перетолчин, 1908]. В наших исследованиях он является некоторой вехой для сравнения динамики с другими ледниками трансекта. К сожалению, как и для многих районов оледенения, не удалось найти данные на 1980-е гг. В последнее время он равномерно, но незначительно сокращается. За 120 лет площадь его открытой части уменьшилась более чем в 2 раза, происходит активное бронирование нижней части языка ледника. Ледник Топографов (№ 18) в Восточном Саяне более устойчив, но также равномерно сокращается. Хорошо просматривается 10–11-летний цикл замедления сокращения. Ближе к центральной и южной части трансекта сильнее проявляются циклы не только сокращения и замедления уменьшения площади, но даже и ее увеличения. Это хорошо заметно на леднике Цаст-Ула в Монгольском Алтае. Если к 2005 г. у северных ледников площадь заметно сокращалась, то у ледников центральной части трансекта она даже возрастала, что отмечается на леднике Карлыктаг Восточного Тянь-Шаня. Ледник Алтынтаг в хребте Куньлунь равномерно сокращается с 1995 г. Самое нестабильное состояние наблюдается у ледника Юбра в горах Лангтанг центральной части Непальских Гималаев.

Скорость и степень сокращения ледников с 1970-х гг. по настоящее время представлена в табл. 2. Скорость сокращения увеличивается от северного края трансекта к южному. Наибольшее уменьшение открытой части отмечается у ледника Цаст-Ула Монгольского Алтая. Повышенную устойчивость проявили ледники Черского и Топографов северной части трансекта.

Табл. 2. Степень и скорость сокращения ледников трансекта  
Table 2. Size and rate of glacier area decrease

Название ледника	Средняя скорость уменьшения, км <sup>2</sup> /год	Сокращение, %
Азаровой	0,007	37
Урёл-Амутис	0,005	59
Черского	0,002	17
Перетолчина	0,012	48
Топографов	0,004	18
Цаст-Ула	0,056	63
Алтынтаг	0,013	21
Карлыктаг	0,073	21
Юбра	0,085	33

По данным международных БД ледник, к примеру, Перетолчина имел площадь 0,21 км<sup>2</sup> (GLIMS, 2002 г.), 0,28 (GAMDAM, 2007 г.), 0,24 (ИГ РАН, 2019 г.). Данные БД ИГ РАН [Хромова и др., 2021] близки к нашим результатам, но данные GLIMS и GAMDAM получены автоматическим методом и поэтому занижены. Подобный эффект отмечается в специальных исследованиях [Nuimura et al., 2015; Paul et al., 2017].

## ВЫВОДЫ

В результате ГИС-анализа данных ДЗЗ Landsat выявлены общие тенденции изменения открытой части ледников в горных хребтах трансекта от хребта Кодар до Гималаев. Анализ данных с 5-летним интервалом позволяет выявить общие тенденции и особенности отдельных ледников. Однако анализ по ежегодным данным может выявить характерные аномалии поведения ледников [Китов и др., 2019]. Рассматриваемые ледники в хребтах трансекта сокращаются, но с различной скоростью. Несомненно, абсолютные величины изменения больших ледника превышают аналогичные величины изменения малых ледников северной части трансекта. Отмеченные периоды некоторого увеличения открытой части ледника по величине укладываются в диапазон ошибок и говорят лишь о тенденции замедления сокращения ледников.

В докладе по климату [IPCC, 2007, 2021] сообщается, что с 1850 г. по настоящее время средняя континентальная температура выросла на 1,5 °С. Ледники больше всего потеряли в массе с 2010 по 2019 г. по сравнению с предыдущими десятилетиями наблюдения. Эта закономерность подтвердилась на ледниках Кодара, Восточных Саян и южной части трансекта. Однако в Байкальском и Баргузинском хребтах ледники почти не уменьшались по открытой части своей площади.

С продвижением от северного края трансекта к южному скорость сокращения ледников увеличивается от 0,007 до 0,085 км<sup>2</sup>/год. В процентном сокращении ледников от первоначального размера аналогичной зависимости не прослеживается. Но все же у большинства рассматриваемых ледников скорость уменьшения открытой части замедляется.

Наименее достоверны результаты, полученные по топокартам, с одной стороны, из-за разномасштабности, с другой — из-за неточности и генерализации нанесения границ ледников. С середины 1970-х, когда началась съемка спутником Landsat, до наших дней ледники сократились по площади от 17 до 63 %. Но данные до 1980-х гг. были плохого качества и с низким разрешением, что не позволило определить площадь ледников с достаточной точностью. Можно говорить о замедлении и увеличении скорости сокращения ледников, даже если количественно показано некоторое увеличение площади, находящееся в пределах ошибки. Ледники северной части трансекта сокращаются более плавно по сравнению с южной. В южной части наблюдается сокращение и замедление, а иногда и увеличение открытой части ледников примерно с периодичностью 10 лет. Наиболее неравномерная динамика у Гималайского ледника. Скорость сокращения ледников уменьшается с юга к северу трансекта. Ледник Азаровой сокращается со скоростью 0,007 км<sup>2</sup>/год, Урёл-Амутис — 0,005, Черского — 0,002, Перетолчина — 0,012, Топографов — 0,002, Цаст-Ула — 0,056, Алтынтаг — 0,013, Карлыктаг — 0,07, Юбра — 0,085.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190056-4 и АААА-А21-121012190017-5).

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out at the expense of the state task (subject No. AAAA-A21-121012190056-4 and AAAA-A21-121012190017-5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ганюшкин Д. А., Отгонбаяр Д., Чистяков К. В., Кунаева Е. П., Волков И. В.* Современное оледенение хребта Цамбагарав (северо-западная Монголия) и его изменение с максимума малого ледникового периода. *Лед и снег*, 2016. Т. 56. № 4. С. 437–452. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-437-452.
- Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 64 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 2. Ч. 1. Хребет Кодар. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 44 с.
- Китов А. Д., Плюснин В. М., Биличенко И. Н.* Изменение ледников в Гималаях и Южной Сибири по данным Landsat. *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф.* М.: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 146–160. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.
- Котляков В. М., Чернова Л. П., Муравьев А. Я., Хромова Т. Е., Зверкова Н. М.* Изменение горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет. *Лед и Снег*, 2017. Т. 57. № 4. С. 453–467. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.
- Осипов Э. Ю., Осипова О. П., Клевцов Е. В.* Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съемок. *Лед и Снег*, 2017. Т. 57. № 4. С. 483–497. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.
- Отгонбаяр Д.* Современное оледенение горного узла Цамбагарав (Монгольский Алтай). *Вестник Томского государственного университета*, 2011. № 348. С. 177–180.
- Перетолчин С. П.* Ледники хребта Мунку-Сардык. *Известия Томского технического института*. Томск: Типолитография Сибирского товарищества печатного дела, 1908. Т. 9. 60 с.
- Руководство по составлению Каталога ледников СССР. М.: Наука, 1967. 156 с.
- Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Глазовский А. Ф., Муравьев А. Я., Никитин С. А., Лаврентьев И. И.* Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.). *Лед и Снег*, 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358. DOI: 10.31857/S2076673421030093.
- Vajracharya S. R., Mool P.* Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 2009. V. 50. No. 53. P. 81–86.
- Gao J., Liu Y.* Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: A review. *Progress in Physical Geography*, 2001. V. 25. No. 4. P. 520–540.
- Hartman G. M. D.* Ice-drainage basin delineation and glacier classification for the arctic ice caps using GIS and GLIMSView software. *GLIMS*, 2006. 36 p.
- IPCC. *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Geneva: IPCC, 2007. 996 p.
- IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC.* Geneva: IPCC, 2021. 2337 p.
- Keiji H., Okitsugu W., Hiroji F., Shuhei T., Akio N.* Glaciers of Asia – Glaciers of Nepal – Glacier Distribution in the Nepal Himalaya with Comparisons to the Karakoram Range. *Satellite image atlas of glaciers of the World. Geological Survey Professional Paper 1386-F-6*, 2015. P. 293–320.

- Kitov A. D., Kovalenko S. N., Plyusnin V. M.* The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. *Geography and Natural Resources*, 2009. V. 30. No. 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.
- Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K.* The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers. *The Cryosphere*, 2015. V. 9. Iss. 3. P. 849–864. DOI: 10.5194/tc-9-849-2015.
- Owen L. A., Thackray G., Anderson R. S., Briner J., Kaufman D., Roe G., Pfeffer W., Yi C.* Integrated research on mountain glaciers: Current status, priorities and future prospects. *Geomorphology*, 2009. V. 103. No. 2. P. 158–171. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.019.
- Paul F., Bolch T., Briggs K., Kääb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J.* Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers\_cci project. *Remote Sensing of Environment*, 2017. V. 203. No. 15. P. 256–275. DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.038.
- Rau F., Mauz F., Vogt S., Khalsa S. J. S., Raup B.* Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. GLIMS Regional Center Antarctic Peninsula, 2005. 36 p.
- Raup B., Khalsa S. J. S.* GLIMS data analysis tutorial. GLIMS, 2010. 15 p. Web resource: [http://www.glims.org/MapsAndDocsassets/GLIMS\\_Analysis\\_Tutorial\\_a4.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocsassets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf) (accessed 10.03.24).
- RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory — A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Colorado, USA: Digital Media, 2017. DOI: 10.7265/N5-RGI-60.
- Sakai A.* Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia. *The Cryosphere*, 2019. V. 13. P. 2043–2049. DOI: 10.5194/tc-13-2043-2019.
- Shahgedanova M., Popovnin V., Aleinikov A., Stokes C. R.* Geodetic mass balance of Asarova glacier Kodar mountains, Eastern Siberia and its links to observed climatic change. *Annals of Glaciology*, 2011. V. 52(58). P. 129–137.
- Su Z., Shi Y.* Response of monsoonal temperature glaciers to global warming since the Little Ice Age. *Quaternary International*, 2002. V. 97(98). P. 123–131.
- Wagnon P., Vincent C., Arnaud Y., Berthier E., Vuillermoz E., Gruber S., Ménégoz M., Gilbert A., Dumont M., Shea J. M., Stumm D., Pokhrel B. K.* Seasonal and annual mass balances of Mera and Pokalde glaciers (Nepal Himalaya) since 2007. *The Cryosphere*, 2007. V. 7. P. 1769–1786. DOI: 10.5194/tc-7-1769-2013.
- WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4(2018–2019). ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

## REFERENCES

- Bajracharya S. R., Mool P.* Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 2009. V. 50. No. 53. P. 81–86.
- Catalogue of glaciers of the USSR. V. 16. Iss. 1. Part 3–5. Iss. 2. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 64 p. (in Russian).
- Catalogue of glaciers of the USSR. V. 17. Iss. 2. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 44 p. (in Russian).

*Ganyushkin D. A., Otgonbayar D., Chistyakov K. V., Kunaeva E. P., Volkov I. V.* Recent glacierization of the Tzambagarav ridge (North-Western Mongolia) and its changes since the Little Ice Age maximum. *Ice and Snow*, 2017. V. 56. No. 4. P. 437–452 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-437-452.

*Gao J., Liu Y.* Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: A review. *Progress in Physical Geography*, 2001. V. 25. No. 4. P. 520–540.

Guidelines for compiling the Catalogue of Glaciers of the USSR. Moscow: Nauka, 1967. 156 p. (in Russian).

*Hartman G. M. D.* Ice-drainage basin delineation and glacier classification for the arctic ice caps using GIS and GLIMSView software. *GLIMS*, 2006. 36 p.

IPCC. *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Geneva: IPCC, 2007. 996 p.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC.* Geneva: IPCC, 2021. 2337 p.

*Keiji H., Okitsugu W., Hiroji F., Shuhei T., Akio N.* Glaciers of Asia – Glaciers of Nepal – Glacier Distribution in the Nepal Himalaya with Comparisons to the Karakoram Range. *Satellite image atlas of glaciers of the World. Geological Survey Professional Paper 1386-F-6*, 2015. P. 293–320.

*Khromova T. Y., Nosenko G. A., Glazovsky A. F., Muraviev A. Y., Nikitin S. A., Lavrentiev I. I.* New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Ice and Snow*, 2021. V. 61. No. 3. P. 341–358 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673421030093.

*Kitov A. D., Kovalenko S. N., Plyusnin V. M.* The results of 100-year-long observations of the glacial geosystem dynamics in the Munku-Sardyk massif. *Geography and Natural Resources*, 2009. V. 30. No. 3. P. 272–278. DOI: 10.1016/j.gnr.2009.09.012.

*Kitov A. D., Plyusnin V. M., Bilichenko I. N.* Change of glaciers in the Himalayas and Southern Siberia according to Landsat. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 2. P. 146–160 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.

*Kotlyakov V. M., Chernova L. P., Muravyev A. Ya., Khromova T. E., Zverkova N. M.* Change of mountain glaciers in the Northern and Southern hemispheres over the past 160 years. *Ice and Snow*, 2017. V. 57. No. 4. P. 453–467 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.

*Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K.* The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers. *The Cryosphere*, 2015. V. 9. Iss. 3. P. 849–864. DOI: 10.5194/tc-9-849-2015.

*Osipov E. Y., Osipova O. P., Klevtsov E. V.* Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveys. *Ice and Snow*, 2017. V. 57. No. 4. P. 483–497 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.

*Otgonbayar D.* Modern glaciation of the Tsambagarav mountain junction (Mongolian Altai). *Tomsk State University Journal*, 2011. No. 348. P. 177–180 (in Russian).

*Owen L. A., Thackray G., Anderson R. S., Briner J., Kaufman D., Roe G., Pfeffer W., Yi C.* Integrated research on mountain glaciers: Current status, priorities and future prospects. *Geomorphology*, 2009. V. 103. No. 2. P. 158–171. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.019.

*Paul F., Bolch T., Briggs K., Kääh A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J.* Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers\_cci project. *Remote Sensing of Environment*, 2017. V. 203. No. 15. P. 256–275. DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.038.

*Peretolchin S. P.* Glaciers of the Munku-Sardyk ridge. News of the Tomsk Technical Institute. Tomsk: Typolithography of the Siberian Printing Association, 1908. V. 9. 60 p. (in Russian).

*Rau F., Mauz F., Vogt S., Khalsa S. J. S., Raup B.* Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual. Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. GLIMS Regional Center Antarctic Peninsula, 2005. 36 p.

*Raup B., Khalsa S. J. S.* GLIMS data analysis tutorial. GLIMS, 2010. 15 p. Web resource: [http://www.glims.org/MapsAndDocsassets/GLIMS\\_Analysis\\_Tutorial\\_a4.pdf](http://www.glims.org/MapsAndDocsassets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf) (accessed 10.03.24).

RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory — A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Colorado, USA: Digital Media, 2017. DOI: 10.7265/N5-RGI-60.

*Sakai A.* Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia. *The Cryosphere*, 2019. V. 13. P. 2043–2049. DOI: 10.5194/tc-13-2043-2019.

*Shahgedanova M., Popovnin V., Aleinikov A., Stokes C. R.* Geodetic mass balance of Asarova glacier Kodar mountains, Eastern Siberia and its links to observed climatic change. *Annals of Glaciology*, 2011. V. 52(58). P. 129–137.

*Su Z., Shi Y.* Response of monsoonal temperature glaciers to global warming since the Little Ice Age. *Quaternary International*, 2002. V. 97(98). P. 123–131.

*Wagnon P., Vincent C., Arnaud Y., Berthier E., Vuillermoz E., Gruber S., Ménégoz M., Gilbert A., Dumont M., Shea J. M., Stumm D., Pokhrel B. K.* Seasonal and annual mass balances of Mera and Pokalde glaciers (Nepal Himalaya) since 2007. *The Cryosphere*, 2007. V. 7. P. 1769–1786. DOI: 10.5194/tc-7-1769-2013.

WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4(2018–2019). ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

---