

А.Д. Китов¹, В.М. Плюснин²

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ОТДЕЛЬНЫХ ЛЕДНИКОВ МАССИВА МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН) И ХРЕБТА ЦАСТ-УЛА (МОНГОЛЬСКИЙ АЛТАЙ)

АННОТАЦИЯ

Продолжая исследования современного оледенения на примере отдельных горных массивов внутриконтинентальной части Азии вдоль широтного трансекта от гор Кодара до Гималаев, в данной работе рассмотрен хребет Цаст-Ула в Монгольском Алтае. Эти ледники, как объекты трансекта, представляют его западную часть. Ледники северо-западной Монголии исследуются гляциологами, хотя и не столь подробно, как ледники центральной части Алтая и Тянь-Шаня. Интерес представляет рассмотрение их динамики в сравнении с другими ледниковыми массивами трансекта. В Восточном Саяне наиболее изучены (более 100 лет) нивально-гляциальные объекты хребта Мунку-Сардык. В данной работе рассмотрены изменения ледников при главных вершинах горного массива Мунку-Сардык и хребта Цаст-Ула. На всем протяжении трансекта наблюдается сокращение ледников и повышение интенсивности бронирования поверхностными моренами. Бронирование моренами нижней части маленьких ледников Цаст-Ула происходит аналогично ледникам Мунку-Сардык. По данным дистанционного зондирования Земли (Landsat) выполнено сравнение динамики как всего массива, так и отдельных ледников № 7, 8 Цаст-Ула и ледников № 31 (Перетолчина) и № 30 (Радде), которое показывает, что ледники сокращаются в разной степени. С середины 1970-х гг. ледник № 7 сократился по площади на 19 %, в длину примерно на 5 %, № 8 — соответственно на 58 % и 31 %. Уменьшение по площади всего массива Цамбагарав в среднем проходило со скоростью 0,31 км²/г. Ледники Цаст-Ула сокращались неравномерно со средней скоростью 0,32 км²/г., потеряв 22 % своей площади. Ледники массива Мунку-Сардык сокращаются примерно в 4 раза медленнее. Ледник Перетолчина за последние 20 лет сокращался по площади со скоростью 0,005 км²/г., а за весь период наблюдения с 1900 г. — 0,004 км²/г. По длине за этот же период ледник сокращался со скоростью 5 м/г. Открытая часть ледника Перетолчина от конечной морены стадии окончания малого ледникового периода уменьшилась как по площади, так и длине примерно в 2 раза. Выявлены аномальные изменения у рассматриваемых ледников в 2013–2015 гг., как для хребта Цаст-Ула, так и для Мунку-Сардыка. К 2013–2014 гг. наблюдалось увеличение площади открытой части ледников и площади многолетних снежников и резкое сокращение после 2015 г., в некоторых случаях в виде схода частей ледников.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточный Саян, Монгольский Алтай, ледник, дистанционные исследования, трансект

¹ Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, e-mail: kitov@irigs.irk.ru

² Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, д. 1, Иркутск, Россия, 664033, e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru

Aleksandr D. Kitov¹, Viktor M. Plyusnin²

**COMPARATIVE DYNAMICS OF INDIVIDUAL GLACIERS
OF THE MUNKU-SARDYK MASSIF (EASTERN SAYAN)
AND THE TZAST-ULA RIDGE (MONGOLIAN ALTAI)**

ABSTRACT

Continuing the study of modern glaciation on the example of individual mountain ranges of the inland part of Asia along the latitudinal transect from the Kodar Mountains to the Himalayas, this work considers the Tzast-Ula massif in the Mongolian Altai. These glaciers, as objects of the transect, represent its western part. The glaciers of northwestern Mongolia are studied by glaciologists, although not as detailed as the glaciers of the central part of Altai and the Tien Shan. It is interesting to consider their dynamics in comparison with other glacial massifs of the transect. In the Eastern Sayan, the most studied (more than 100 years) are the nival-glacial objects of the Munku-Sardyk range. In this paper, changes in glaciers at the main peaks of the Munku-Sardyk mountain range and the Tzast-Ula ridge are considered. Throughout the transect there is a reduction in glaciers and an increase in the intensity of armor by surface moraines. Moraine reservation of the lower part of the small glaciers of Tzast-Ula occurs, similar to the glaciers of Munku-Sardyk. According to the remote sensing data (Landsat), a comparison of the dynamics of both the entire massif and individual glaciers No. 7, 8 Tzast-Ula and glaciers No. 31 (Peretolchina) and No. 30 (Radde) was made, which shows that glaciers are shrinking to varying degrees. Since the mid-1970s, Glacier No. 7 has shrunk in area by 19 %, in length by about 5 %, No. 8 by 58 % and 31 %, respectively. The decrease in the area of the entire Tsambaragav massif on average took place at a speed of 0.31 km²/year. The glaciers of Tzast-Ula were shrinking unevenly at an average speed of 0.32 km²/year, losing 22 % of their area. The glaciers of the Munku-Sardyk massif are shrinking about 4 times slower. Over the past 20 years, the Peretolchina glacier has been shrinking in area at a rate of 0.005 km²/year, and for the entire observation period since 1900 — 0.004 km²/year. In length, during the same period, the glacier was shrinking at a rate of 5 m/year. The open part of the Peretolchina glacier from the final moraine of the end stage of the Little Ice Age decreased both in area and length by about half. Anomalous changes were detected in the glaciers under consideration in 2013–2015, both for the Tzast-Ula ridge and for Munku-Sardyk. By 2013–2014, there was an increase in the area of the open part of glaciers and the area of perennial snowfields and a sharp decrease after 2015, in some cases in the form of a descent of parts of glaciers.

KEYWORDS: East Sayan, Mongolian Altai, glacier, remote research, transect

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата находит отражение в динамике ледников. Особенно чувствительны малые горные ледники [IPCC, 2007, 2021]. В результате потепления происходит сокращение ледников. Сокращаются как большие долинные ледники, так и малые каровые, однако малые ледники более чувствительны к изменению климата. Выявление закономерностей колебания малых ледников внутриконтинентальных горных систем с реакцией крупных ледников на изменение климата — фундаментальная задача географических исследований. Нами рассматривается динамика ледников в пределах

¹ V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: kitov@irigs.irk.ru

² V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1, Ulan-Batorskaya str., Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: plyusnin@irigs.irk.ru

трансекта от горных массивов Прибайкалья до гор Тянь-Шаня и Гималаев [Китов и др., 2019]. По мере наращивания групп спутников дистанционного зондирования появляется возможность более детальной и регулярной инвентаризации ледников с применением программных комплексов ГИС (географическая информационная система) с последующим составлением и обновлением электронных каталогов ледников [Gao, Liu, 2001; Owen et al., 2009; RGI Consortium, 2017]. Некоторые спутниковые системы поставляют данные с 1970-х гг. прошлого века. Такими общедоступными данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются снимки космического аппарата Landsat. Площадь открытой части ледника представляется наиболее чувствительным показателем его изменения. Границы открытой части ледника обычно хорошо дешифрируются по данным Landsat. В данной работе рассматривается динамика ледников по названной характеристике с использованием данных ДЗЗ с периодичностью около 5 лет.

В качестве ключевого участка для сравнительной динамики с другими массивами современного оледенения выбраны ледники хр. Мунку-Сардык (Восточный Саян) [Каталог, 1973; Осипов и др., 2017; Kitov et al., 2009]. Сравнимые ледники сосредоточены в его наиболее высокой юго-восточной части — это наиболее изученные (более 100 лет) ледники Перетолчина и Радде под наивысшей вершиной Мунку-Сардык (3491 м н. у. м.), которая находится на границе России и Монголии (рис. 1) [Перетолчин, 1908]. По результатам мониторинга составлены базы данных (БД) ледников Прибайкалья [Китов и др., 2017]. Ледники Мунку-Сардыка сравнивались с некоторыми ледниками Восточного Тянь-Шаня, Гималаев [Китов и др., 2019]. Были выявлены корреляции в динамике ледника Азаровой (Кодар) и ледника Кхумбу (Непал). Это требует дополнительных исследований в других горных массивах.

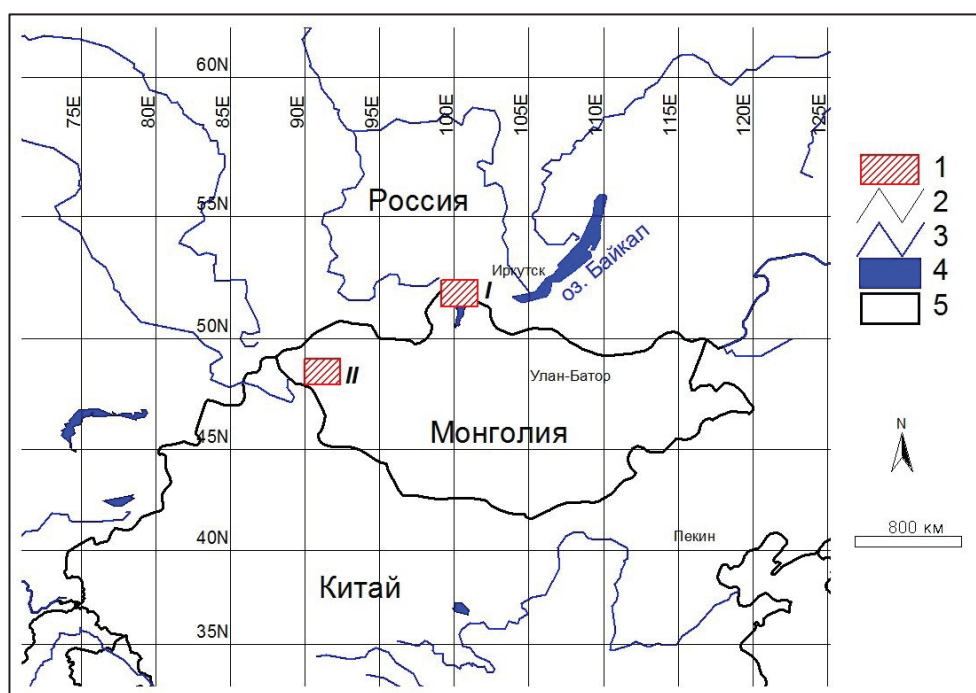


Рис. 1. Общий вид расположения участков трансекта: 1) ключевые участки (районы исследования): I — хребет Мунку-Сардык (Восточный Саян); II — массив Цамбагарав (Монгольский Алтай); 2) координатная сетка; 3) реки; 4) озера; 5) государственные границы
 Fig. 1. General view of the transect areas: 1) area of study: I — Munku-Sardyk Ridge (Eastern Sayan); II — Tzambaragav massif (Mongolian Altai); 2) coordinate grid; 3) rivers; 4) lakes; 5) state borders

Д.А. Ганюшкиным с соавторами [2016], а также Д. Отгонбаяр [2012] был изучен массив Цамбагарав на северо-западе Монголии, попадающий в западную окраину рассматриваемого трансекта.

Целью исследования является сравнение ледников Перетолчина и Радде северной экспозиции хр. Мунку-Сардык в Восточном Саяне (рис. 1, ключевой участок I; рис. 2а), ежегодный наземный мониторинг которых ведется с 2002 г., с ледниками хр. Цаст-Ула в Монгольском Алтае (рис. 1, ключевой участок II; рис. 2б) № 7 (один из наибольших) северной экспозиции, стекающий с главной вершины г. Цаст-Ула, 4208 м н. у. м., и № 8, сопоставимый по размеру с ледниками Мунку-Сардыка. Динамика ледников по площади их открытой части сравнивалась с учетом небольшой облачности, сезонной представительности ледников (на момент конца абляции) и с периодичностью около 5 лет.

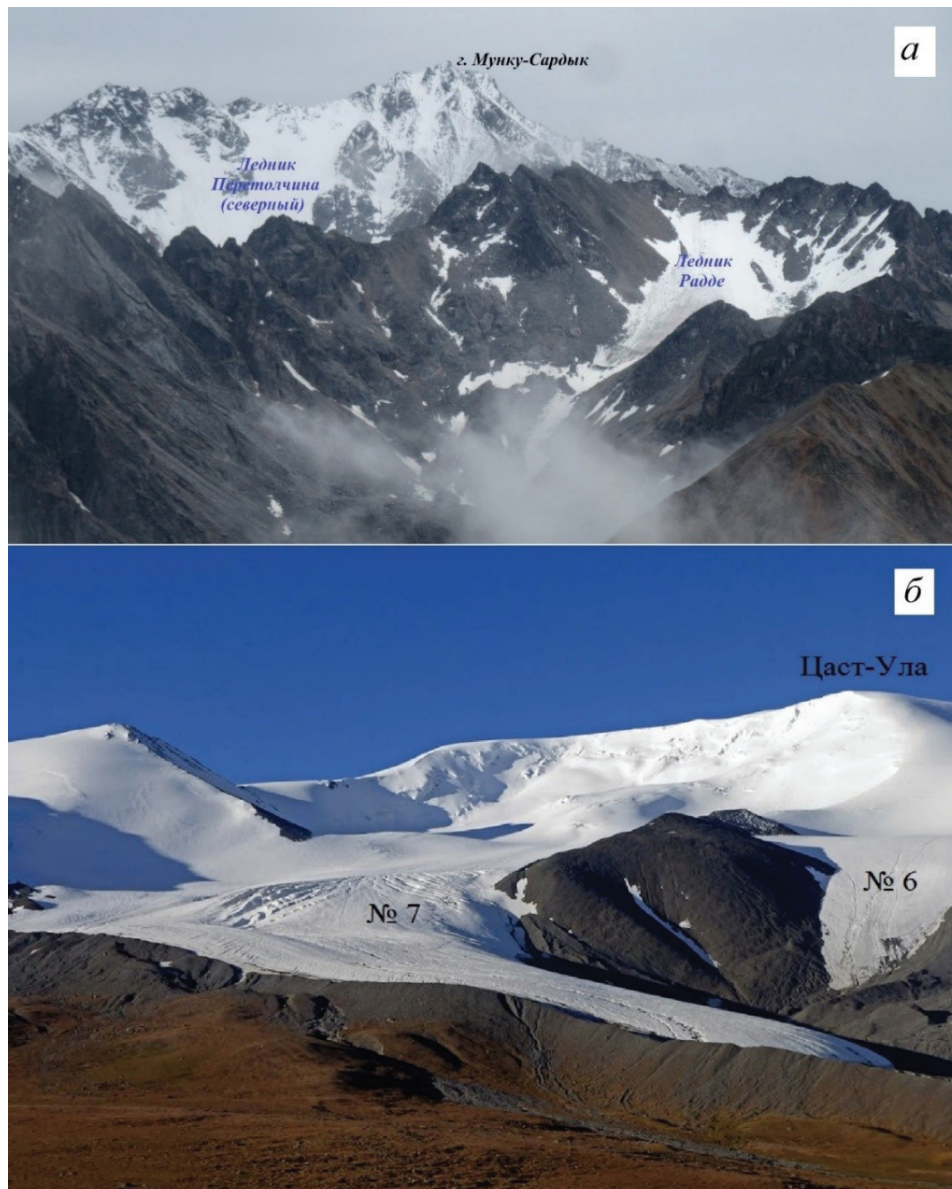


Рис. 2. Вид на ледники хр. Мунку-Сардык (а), фото автора, авг. 2022 г., и хр. Цаст-Ула (б), фото Roger Nix, авг. 2014 г.

Fig. 2. View of the glaciers of the Munku-Sardyk Range (a), photo by the author, Aug. 2022, and of the Tsast-Ula Range (b), photo by Roger Nix, Aug. 2014

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Инвентаризация состояния ледников Мунку-Сардыка в разные годы выполнялась с использованием схемы С.П. Перетолчина [1908], данных каталога ледников СССР [1973], топографических карт, разномасштабных данных ДЗЗ, полученных со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat 4, 5, 7, 8. Картографирование и отслеживание динамики ледников Цаст-Ула выполнялись по данные Landsat 2, 5, 7, 8, 9 с сайта Геологической службы США с 1977 по 2022 гг. (табл. 1). Использовались 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 других исследований.

Табл. 1. Список кадров Landsat на территорию хребта Цаст-Ула
Table 1. Landsat frame list on the territory of the Tzast-Ula Range

Дата съемки	Кадр Landsat	Пространственное разрешение, м	Облачность (%) и качество
13.08.1977	LM02_L1TP_153026	60	1 %, хороший
30.08.1987	LT05_L1TP_142026	30	40 %, удовлетворительный
31.07.1988	LT05_L1TP_142026	30	49 %, удовлетворительный
03.08.1989	LT05_L1TP_142026	30	9 %, хороший
22.08.1990	LT05_L1TP_142026	30	3 %, хороший
17.08.1994	LT05_L1TP_142026	30	14 %, хороший
04.08.1995	LT05_L1TP_142026	30	7 %, хороший
04.08.2001	LT05_L1TP_142026	30	17 %, хороший
07.08.2002	LT05_L1TP_142026	30	10 %, хороший
15.08.2005	LT05_L1TP_142026	30	1 %, хороший
16.08.2005	LE07_L1TP_141026	15	0 %, полосы
10.08.2009	LT05_L1TP_142026	15	49 %, хороший
02.08.2009	LE07_L1TP_142026	15	15 %, полосы
14.08.2010	LE07_L1TP_141026	15	1 %, полосы
16.08.2011	LT05_L1TP_142026	15	3 %, хороший
06.08.2013	LE07_L1TP_141026	15	28 %, удовлетворительный
21.08.2013	LC08_L1TP_142026	15	2 %, хороший
22.08.2013	LE07_L1TP_141026	15	1 %, полосы
30.08.2013	LC08_L1TP_141026	15	10 %, хороший
16.08.2014	LE07_L1TP_142026	15	19 %, полосы
24.08.2014	LC08_L1TP_142026	15	8 %, удовлетворительный
04.08.2015	LC08_L1TP_141026	15	3 %, хороший
12.08.2015	LE07_L1TP_142026	15	8 %, полосы
27.08.2015	LC08_L1TP_142026	15	21 %, хороший
30.07.2019	LC08_L1TP_141026	15	11 %, хороший
01.08.2020	LC08_L1TP_141026	15	10 %, удовлетворительный
15.08.2022	LC09_L1TP_141026	15	1 %, хороший

Границы и площадь наиболее раннего состояния массива определялись по безоблачному снимку 1977 г. Оптимальное временное окно, когда можно определить состояние ледника в году, всего около 20–25 дней — примерно с 1-х до 20-х чисел августа. Периодичность съемки спутника Landsat — полмесяца. В отдельные годы в близкие даты съемка выполнялась разными спутниками — например, Landsat 5 и 7 или Landsat 7 и 8; поэтому (с учетом облачности) приходилось иногда выделять границу ледника по

комбинации кадров разных близких дат съемки данного года или соседних лет. Для улучшения видимости при дешифрировании использовались преобразования исходного растра типа Histogram equalize, Standard deviations, Gaussian и др.

Космические снимки были приведены к единой проекции WGS-84, UTM-зона 47 (Мунку-Сардык) и 46 (Цаст-Ула). Дешифрирование и векторизация границ объектов проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков 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, 8, 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. Все измерения выполнялись в ГИС-программе ArcViewGIS-3.2a. При выделении границ ледника учитывались рекомендации Международного проекта GLIMS [Rau et al., 2005; Hartman, 2006; Raup, Khalsa, 2010; Paul et al., 2013; 2017; RGI Consortium, 2017]. Погрешность определялась как произведение протяженности границы ледника (периметра) на разрешающую способность снимка. Ошибка dS в процентах определялась по формуле: $dS = Sp / S * 100$, где S — площадь ледника; Sp — площадь границы ледника с учетом размера пикселя. Учитывая пространственное разрешение снимка Landsat 7, 8, 9 в 15 м/пикс погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км² или 5–8 % от измеряемой величины. Для снимков Landsat 2, 5 с разрешением 60 и 30 м/пиксель точность определения площади порядка 10–20 %.

Нами была выбрана более детальная схема и нумерация ледников, предложенная Д.А. Ганюшкиным с соавторами [2016] (рис. 3а), что позволяет сопоставлять данные всех 21 ледников. Нумерация начинается с западного края хребта. Схема хр. Цаст-Ула с другой нумерацией (с восточного края) только 15-ти ледников предложена Д. Отгонбаяр [2012] (рис. 3б); она отражает состояние ледников на 2008 г. Ледники хр. Цаст-Ула в международном формате WGI (World Glacier Inventory) вошли в БД GLIMS и RGI, где границы ледников хранятся в формате shp-файлов (совместим с форматом данных нашего ГИС-проекта). Выделение границ ледников для указанных БД выполнялось автоматически по данным ДЗЗ ASTER¹.

Границы ледников в этих БД более генерализованные. Эти ледники мы пронумеровали аналогично схеме Д. Отгонбаяр (рис. 3в). Контуры сравниваемых ледников Мунку-Сардык по данным БД GLIMS и выделенных нами по данным Landsat примерно на это же время представлены на рис. 3г. Разработчики проекта GAMDAM утверждают, что инвентаризация ледников по их методу точнее [Nuimura et al., 2015; Sakai, 2019]. Схема ледников по этой инвентаризации на 2002 г. схожа со схемой RGI и Д. Отгонбаяр (рис. 3б, 3в).

Сравнение разных методов выделения границ ледников (автоматических и визуальных) по безоблачным снимкам, не имеющих крутых затененных склонов, показывает достаточно близкие результаты с ошибкой 2–5 % [Gao, Liu, 2001; Paul et al., 2013; 2017]. Автоматический метод эффективен для большого количества ледников и требует последующего ручного редактирования. Нами был выбран ручной метод дешифрирования с ориентацией на границы, выделенные Д.А. Ганюшкиным по данным Landsat 2015 г. как реперные. Дешифрирование производилось с наиболее раннего снимка 1977 г. Результаты дешифрирования в ГИС-проекте копировались как полигональная тема для следующего года (в нашем случае для 1989 г.) и редактировалась по соответствующей подложке — снимку 1989 г.; затем процедура повторялась для 1995 г. и т. д. Такой подход позволяет сосредоточиться на изменениях края ледника. В сомнительных случаях результаты векторизации обсуждались с соавтором (моделировалось двойное дешифрирование).

¹ Glims Glacier Database. Электронный ресурс: <http://glims.colorado.edu/glacierdata/> (дата обращения 15.02.2023).

Аналогично дешифрировались ледники хр. Муку-Сардык. Дополнительно использовались характеристики ледников из БД Института географии РАН¹ [Хромова и др., 2021] и электронных международных БД, в т. ч. GLIMS, RGI и GAMDAM. Идентификаторы WGI SU5B16201031 и SU5B16201030 ледников Перетолчина и Радде аналогичны кодам в каталоге ледников СССР [Каталог, 1973] (рис. 3г).

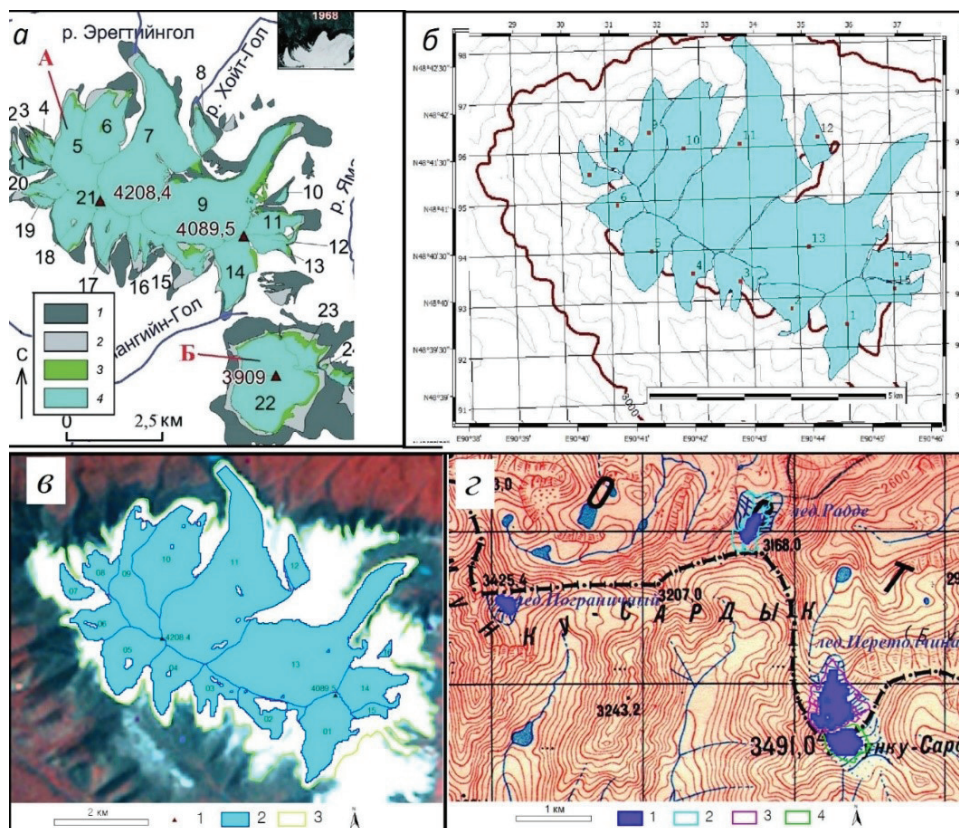


Рис. 3. Массив Цамбагарав, хребет Цаст-Ула: а) основная схема ледников Цаст-Ула (2015 г.), 1–21 номера ледников [Ганюшкин и др., 2016]; б) генерализованная схема Цаст-Ула (2008 г.), 1–15 номера ледников [Отгонбаяр, 2012]; в) границы ледников Цаст-Ула из БД GLIMS (2013 г.): 1 — вершины, 2 — ледники, 3 — граница массива по данным Landsat, фон — данные Landsat 13.08.1977 г.; г) ледники Мунку-Сардык: 1 — БД GLIMS (по данным ASTER 20.08.2002 г., ледники: Пограничный, Радде, Перетолчина — северный и южный), 2–4 — границы ледников Радде, Перетолчина (северный), Перетолчина (южный) соответственно по данным Landsat 7 13.08.2000 г.; фон — фрагмент топографической карты 1960-х гг.

Fig. 3. Massif Tzambagarav, the Tzast-Ula Range: a) the main scheme of the Tzast-Ula glaciers (2015), 1–21 numbers of glaciers [Ganyushkin et al., 2016]; b) the generalized scheme of Tzast-Ula (2008), 1–15 numbers of glaciers [Otgonbayar, 2012]; c) boundaries of Tzast-Ula glaciers from the GLIMS database (2013): 1 — peaks, 2 — glaciers, 3 — boundary of the array according to Landsat data, background — Landsat data on 13.08.1977; d) glaciers Munku-Sardyk: 1 — DB GLIMS (submitted by ASTER on 20.08.2002, glaciers: Pogranichnyi, Radde, Peretolchina — northern and southern), 2–4 — boundaries of glaciers Radde, Peretolchina (northern), Peretolchina (southern), respectively, according to Landsat 7 on 13.08.2000; background is a fragment of the topographic map 1960

¹ Каталог Ледников России, Отдел гляциологии Института географии РАН. Электронные ресурсы: <https://www.glacru.ru>, <http://glac.igras.ru/> (дата обращения 01.02.2023).

Схема С.П. Перетолчина [1908] недостаточно точна, поэтому нами была выполнена реконструкция ледников хребта Мунку-Сардык по конечным моренам, хорошо дешифрируемым по данным высокого разрешения (0,6 м/пикс) Quick Bird. В ГИС-проекте эта схема была привязана (функция rectification) к космоснимку по характерным выступам скал у низа и верха ледника Перетолчина. Использовались также GPS-треки гребней боковых и конечных морен и отмеченные еще С.П. Перетолчиным большие камни для наземной съемки. После этого выполнена векторизация границ ледника. Дополнительно для уточнения границ сопоставлялись наземные фотоснимки, сделанные С.П. Перетолчиным и авторские фотоснимки современного состояния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате ГИС-анализа оценивалась площадь открытой части всего массива ледников (табл. 2), где Year — год получения данных; S — площадь ледника в км²; dS — точность определения площади ледника с учетом пространственного разрешения исходных данных в процентах; VS_Y — скорость изменения площади ледника км²/г.; Data — вид исходных данных (Landsat-N соответствующие данные со спутника Landsat).

Табл. 2. Изменение площади открытой части ледников хребта Цаст-Ула
Table 2. Change in the area of the open part of the glaciers of the Tzast-Ula Range

Year	S , km ²	dS , %	VS_Y	Data
1977	32,65	9,69		Landsat-2
1989	23,42	7,02	-0,77	Landsat-5
1995	23,19	6,91	-0,04	Landsat-5
2001	21,62	7,07	-0,26	Landsat-5
2005	21,81	7,62	0,05	Landsat-5
2011	19,86	4,45	-0,33	Landsat-7
2013	21,26	3,54	0,63	Landsat-7
2014	20,07	4,09	-1,05	Landsat-8
2015	19,23	4,50	-0,84	Landsat-8
2020	19,51	4,10	0,06	Landsat-8
2022	18,16	4,93	-0,67	Landsat-9

Между 1970-ми и 2000-ми гг. в Центральной Азии наблюдался повышенный 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].

Как видно из табл. 2, скорость сокращения площади открытой части ледников неравномерна, наблюдается периодичность (7–11 лет) замедления скорости сокращения. Так, скорость уменьшилась к 1995 г., площадь незначительно увеличилась к 2005, 2013 и 2020 гг. относительно предыдущих лет. Заметна аномалия, наблюдаемая нами в 2013–2015 гг., к 2013 г. площадь открытой части увеличилась, а к 2015 г. резко сократилась (рис. 4).

По сравнению с ледниками хр. Мунку-Сардык, сократившимися по площади и длине открытой части (от конечной морены, до которой в 1900 г. доходил низ ледника [Перетолчин, 1908]) в 2 р., ледники Цаст-Ула сократились меньше. За последние 30 лет общая площадь ледников уменьшилась с 23,4 до 18,2 км² — на 22 %. За это же время ледники № 7 и 8 сократились в длину соответственно на 141 и 251 м (3 и 18 %), а по площади — на 13 и 36 %. Как видно — большой ледник более устойчив, чем маленький.

Изменения ледников № 7 и 8 Цаст-Ула представлены на рисунке 5 и в таблице 3, где Year — год получения данных; S — площадь ледника в km^2 ; VS_Y — скорость изменения площади ледника в $\text{km}^2/\text{г.}$; L — длина ледника в м; VLY — скорость изменения длины, м/г., G2013 — характеристики ледников из БД GLIMS по автоматическому дешифрированию данным ASTER 06.09.2013; D2002 — из БД GAMDAM по данным Landsat 14.07.2002 г.

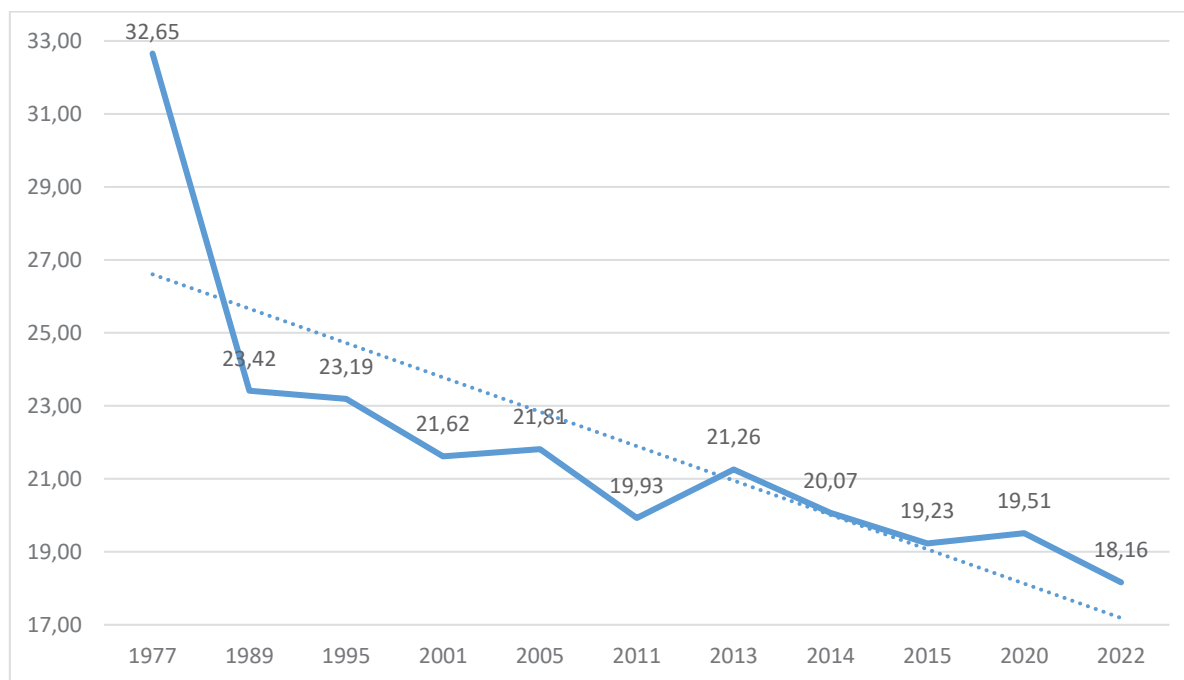


Рис. 4. Изменение площади (km^2) открытой части ледников Цаст-Ула по результатам дешифрирования данных Landsat с 1977 по 2022 гг. Пунктирная линия — тренд изменения площади

Fig. 4. Change in the area (km^2) of the open part of the Tzast-Ula glaciers based on the results of interpretation of Landsat data from 1977 to 2022. The dotted line is the trend of changes in the area

Табл. 3. Изменение площади и длины ледников Цаст-Ула № 7 и 8
Table 3. Change of area and length of Tsast-Ula glaciers No. 7 and 8

Year	S, km^2	VS_Y	L, m	VLY
Ледник № 7				
1977	5,71		4603	
1989	5,30	-0,034	4512	-7,62
2001	5,01	-0,024	4487	-2,12
2013	5,01	0,000	4464	-1,85
2015	4,72	-0,145	4423	-20,84
2022	4,61	-0,016	4377	-6,45
G2013	4,99		4653	
D2002	5,13			
Ледник № 8				
1977	0,80		1654	
1989	0,52	-0,024	1394	-21,64
2001	0,44	-0,007	1307	-7,29
2013	0,43	0,000	1242	-5,40
2015	0,38	-0,025	1217	-12,75
2022	0,33	-0,007	1143	-10,49
G2013	0,35		1217	
D2002	0,4			

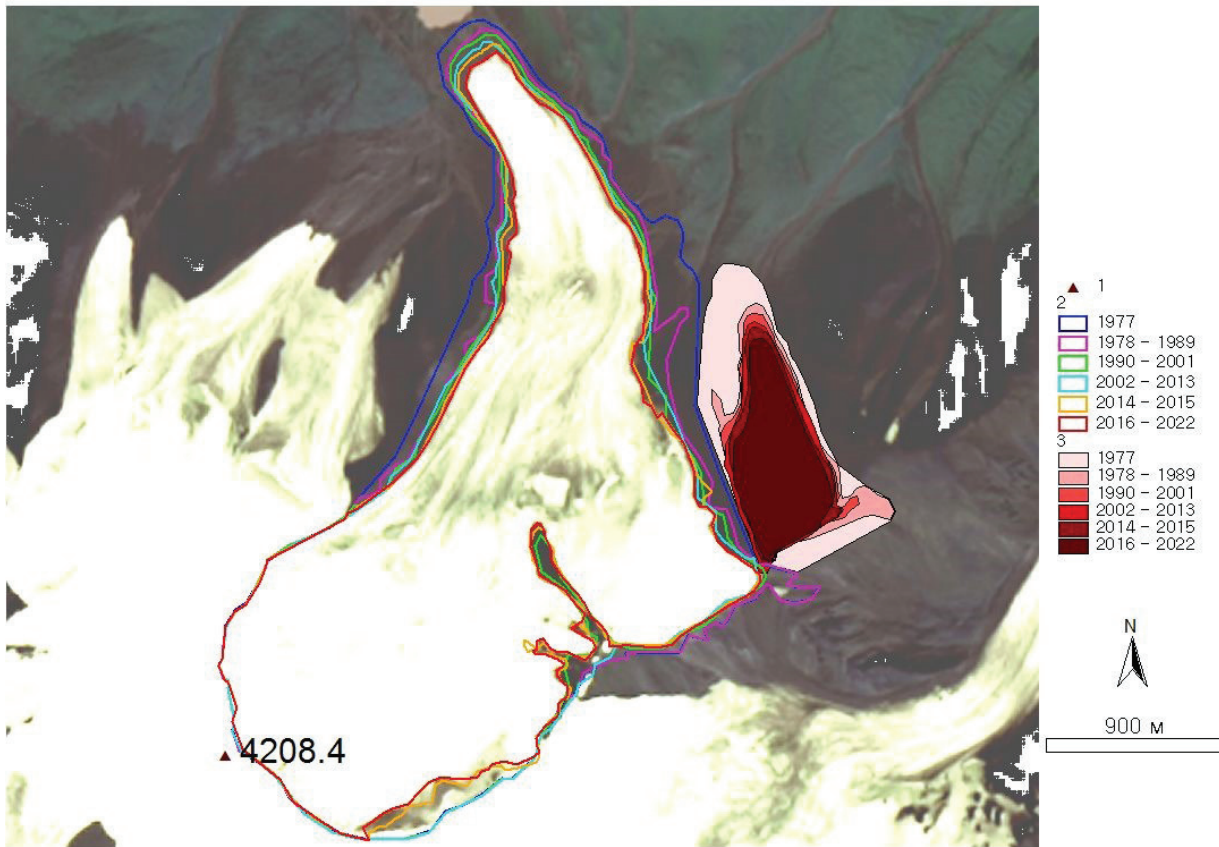


Рис. 5. Изменения ледников Цаст-Ула в 1977–2022 гг.: 1 — вершина; 2 — динамика ледника № 7; 3 — динамика ледника № 8. Фон — космоснимок Landsat-9 15.08.2022 г., синтез каналов 3, 5, 7

Fig. 5. Changes in the glaciers of Tzast-Ula in 1977–2022: 1 — the top; 2 — dynamics of glacier No. 7; 3 — dynamics of glacier No. 8. Background — Landsat-9 satellite image 15.08.2022, synthesis of channels 3, 5, 7

В хребте Мунку-Сардык — 4 ледника: Перетолчина северный и южный, Радде и Пограничный. Ледники Перетолчина северный и Радде расположены на Российской территории в каре северной экспозиции, ледники Пограничный и Перетолчина южный — на Монгольской, в каре юго-юго-восточной экспозиции [Перетолчин, 1908; Kitov et al., 2009]. По данным Landsat изменение ледников хр. Мунку-Сардык (табл. 4) имеет схожий характер с ледниками хр. Цаст-Ула.

В таблице в дополнение к нашим данным добавлены результаты инвентаризации GLIMS (по 2002 г. — G2002), GAMDAM (по 2007 г. — D2007) и ИГ РАН (по 2019 г. — I2019). Данные БД ИГ РАН близки к нашим результатам, но данные GLIMS и GAMDAM занижены, т. к. выделение границ осуществлялось автоматическим методом. Подобный эффект отмечается в специальных исследованиях [Paul et al., 2013; 2017]. Различия в определении площади автоматическим и ручным методом для больших ледников менее выражены (табл. 3) [Takenaka et al., 2015].

Характеристики на 1900 г. даны по результатам реконструкции (описано выше). По фотоснимкам С.П. Перетолчина видно, что вся площадь ледника — это и открытая его часть. Площадь открытой части ледника Перетолчина (северный) составила $0,83 \text{ км}^2$, а длина — $1,47 \text{ км}$. С.П. Перетолчин определил площадь северного ледника — $0,68 \text{ км}^2$. По топографическим картам 1960-х гг. площадь ледника составляла $0,49 \text{ км}^2$. В настоящее

время площадь открытой части — 0,27 км². Скорость сокращения ледника за все 120 лет наблюдения составляет по площади — 0,004 км²/г., а ледник Радде — 0,003 км²/г. Весь массив ледников Мунку-Сардыка сокращался со скоростью 0,05 км²/г. Ледник № 7 Цаст-Ула за последние 45 лет сокращался со скоростью 0,02 км²/г. Ледник Перетолчина сокращается в 4 р. медленнее ледников Цаст-Ула. В первые 50 лет прошлого столетия сокращение ледника Перетолчина было еще медленнее — 0,002 км²/г. За последние 60 лет весь массив ледников по площади сократился на 50 %, а за 120 лет — на 72 %. У ледников Мунку-Сардыка происходит интенсивное бронирование поверхностными моренами, особенно у ледника Радде. На больших ледниках Цаст-Ула такое явление практически не наблюдается. Бронирование можно заметить по данным ДЗЗ на небольшом леднике № 8, который и сократился существенно ледника № 7. Динамика ледников Мунку-Сардыка в 2013–2015 гг. аналогична динамике в горах Цаст-Ула. Отмечается повышение суммы осадков в Восточном Саяне с 2010 г. [Осипов и др., 2017; Khromova et al., 2019], а в аномальные годы наблюдаются изменения в метеорологических показателях (рис. 6).

Табл. 4. Изменение площади ледников хребта Мунку-Сардык по данным Landsat, км²
Table 4. Change in the area of glaciers of the Munku-Sardyk range according to Landsat, km²

Год	Пограничный	Радде	Перетолчина северный	Перетолчина южный	Все ледники	VSY
1900	0,4	0,48	0,83	0,63	2,34	
1960	0,15	0,3	0,49	0,35	1,29	-0,0175
2000	0,12	0,19	0,42	0,20	0,93	-0,009
2006	0,09	0,19	0,37	0,16	0,81	-0,02
2014	0,14	0,20	0,39	0,18	0,91	0,0125
2015	0,07	0,10	0,30	0,11	0,58	-0,33
2018	0,06	0,10	0,26	0,09	0,51	-0,0233
2022	0,11	0,14	0,27	0,13	0,65	0,035
G2002	0,037	0,045	0,21	0,11	0,402	—
D2007	0,075	0,114	0,283	0,123	0,595	—
I2019		0,08	0,24			—

Основные характеристики ледников, такие как масс-баланс водного эквивалента, представляются в бюллетенях WGMS [1991; 2013; 2015; 2017; 2020; 2021]. Обновляются электронные БД ледников, на которые есть ссылки из Бюллетеня. В новых версиях уточняются параметры и границы ледников, но по данным первоначально сделанной спутниковой съемки. Для Цаст-Ула это съемка ASTER 2013 г., а для массива Мунку-Сардык — 2002 г. По этим данным ледник Пограничный имел площадь 0,037 км², Радде — 0,045 км², Перетолчина северный — 0,21 км², Перетолчина южный — 0,11 км². Институт географии РАН обновил электронный вариант БД по данным спутника Sentinel-2 (съемка 27.08.2019 г.). Соответственно площадь ледника Перетолчина северного (Ru10-18.0037) — 0,24 км², а Радде (Ru10-18.0038) — 0,08 км² (табл. 4). К сожалению, в БД приведены только данные российских ледников, а ледник Пограничный (рис. 3г) перемещен с монгольской стороны на российскую (Ru10-18.0039), его площадь — 0,15 км². По советской классификации (SU5B16201029) в каталоге этот ледник значился как погребенный № 29 [Каталог, 1973]. С 2020 г. в БД GLIMS включены данные БД ИГ РАН. Поскольку исходные

данные ДЗЗ для дешифрирования ледников в предыдущей версии БД GLIMS, БД ИГ РАН и БД GAMDAM взяты за разные годы, это уже позволяет отслеживать динамику некоторых ледников по международной БД.

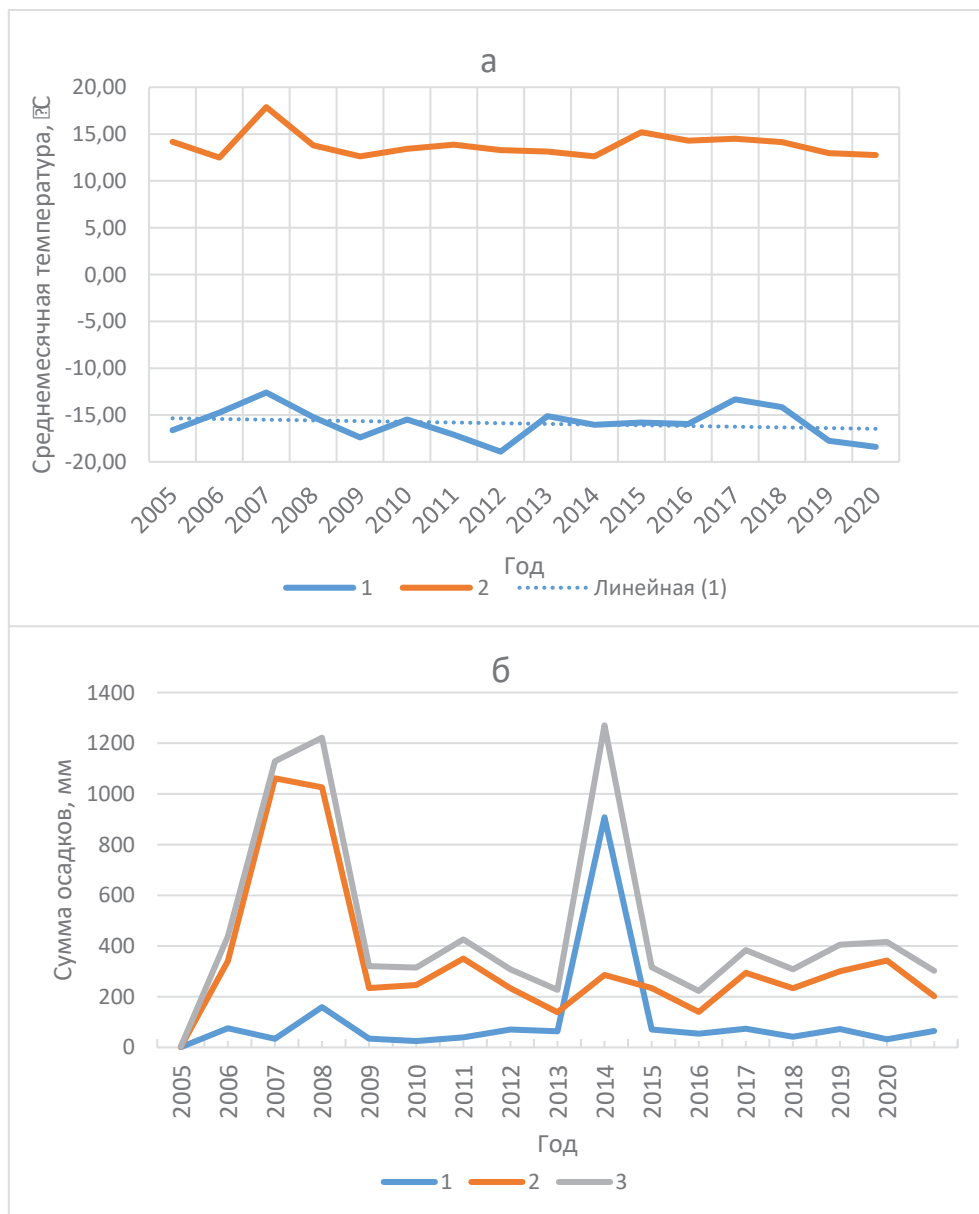


Рис. 6. Климатические характеристики в районе хребта Мунку-Сардык по ближайшей метеостанции Монды, 2005–2020 гг.: а) зимние (1) и летние (2) среднемесячные температуры (соответственно за ноябрь, декабрь, январь, февраль и за июнь, июль, август; пунктирная линия — тренд зимних температур); б) сумма осадков (1 — холодных месяцев: сентябрь — декабрь, январь — март; 2 — теплых: май — август; 3 — за весь год)

Fig. 6. Climatic characteristics in the area of the Munku-Sardyk Range according to nearest the Mondy weather station, 2005–2020: a) winter (1) and summer (2) average monthly temperatures (respectively for November, December, January, February and June, July, August; dotted line — trend of winter temperatures); b) the amount of precipitation (1 — cold months: September – December, January – March; 2 — warm: May – August; 3 — for the whole year)

ВЫВОДЫ

В результате ГИС-анализа данных ДЗЗ выявлены общие тенденции изменения открытой части ледников в горных хребтах Мунку-Сардык в Восточном Саяне и Цаст-Ула в Монгольском Алтае. Выявлены аномальные изменения в период 2013–2015 гг. К 2014 г. во многих горных системах происходило накопление снега в период абляции по сравнению с другими годами в эти же даты. Это выявлено в Гималаях и Тянь-Шане (ледники Лангтанг, Кхумбу, Карлыктаг) [Китов и др., 2019]; в Восточном Саяне изменение площади ледников показаны в табл. 4. Подобное явление наблюдалось и в массиве Цамбагарав, хр. Цаст-Ула на примере ледника № 7 и 8 (табл. 3). В 2015 г. скорость сокращения ледников увеличилась, как бы компенсируя предыдущее замедление. По площади ледники постоянно сокращались, к 2011 г. весь массив уменьшился почти до 20 км², к 2013 г. увеличился более чем на 1 км² (табл. 2). Однако ледник № 7 с 2001 г. сохранил свою площадь, а № 8 немного уменьшился с 0,44 до 0,43 км², однако к 2015 г. все ледники сократились до 19,23 км², а ледники № 7 и 8 соответственно до 4,72 и 0,38 км² (табл. 2, 3). Скорость сокращения в длину у этих ледников увеличилась, причем у большего ледника № 8 в 2 раза сильнее, чем у № 7. В настоящее время (к 2022 г.) ледники Цаст-Ула продолжают сокращаться, но медленнее, а ледники Мунку-Сардыка даже увеличили свою площадь (табл. 4).

Рассматриваемые ледники в хребтах Мунку-Сардык и Цаст-Ула сокращаются, но с различной скоростью. Несомненно, абсолютные величины изменения ледника Цаст-Ула превышают аналогичные величины изменения ледников Мунку-Сардыка, но относительные величины разные. Ледники Перетолчина и Радде сокращаются значительно медленнее, чем Цаст-Ула. Ледники всего массива Цамбагарав сокращаются по 0,31 км²/г. [Ганюшкин и др., 2016]. Вероятно, маленькие каровые ледники, покрываясь интенсивнее поверхностными моренами и оставаясь на крутом склоне верха кара как бы переходят в стадию самосохранения, меньше подвергаются тепловому воздействию. Тем не менее, наблюдаются некоторые схожие процессы динамики ледников в горах Восточного Саяна и Монгольского Алтая.

В докладе по климату [IPCC, 2021; 2022] 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 гг. по сравнению с предыдущими десятилетиями наблюдений. С 1900 по 1990 гг. аномалии температуры были с небольшим перевесом положительных температур. Однако в 2009–2011 гг. и в 2013–2014 гг. отмечены существенные отрицательные аномалии, что, вероятно, отразилось на многих ледниках Азии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190017-5); при поддержке РФФИ, гранта № 20-05-00253А «Трансформация геосистем Байкальской природной территории».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was performed at the expense of the state task (subject No. АААА-А21-121012190017-5); supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No20-05-00253A “Transformation of geosystems of the Baikal natural area”.

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.: Гидрометеоздат, 1973. 80 с. 64 с.
- Китов А.Д., Плюснин В.М., Биличенко И.Н.* Изменение ледников в Гималаях и Южной Сибири по данным Landsat. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 146–160. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.
- Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Батуев Д.А., Коваленко С.Н.* Интернет-представление баз данных ледников юга Восточной Сибири. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2017. Т. 2(23). С. 228–242. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.
- 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.* Водно-ледниковые ресурсы бессточных районов Западной Монголии: современная оценка и тенденции изменения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2012. 24 с.
- Перетолчин С.П.* Ледники хребта Мунку-Сардык. Известия Томского технического ин-та. Т. 9. Томск: Типолиитография Сибирского товарищества печатного дела, 1908. 60 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.
- 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 4 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.
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyaeva V.* Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. Regional Environmental Change, 2019. V. 19. P. 1229–1247. DOI: 10.1007/s10113-018-1446-z.
- 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. 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., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Konovalov V., Bris R.Le., Molg N., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Rastner P., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 2013. V. 54. P. 171–182. DOI: 10.3189/2013AoG63A296.

Paul F., Bolch T., Briggs K., Käab 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: doi.org/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, 2010. 15 p. Web resource: http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf (accessed 05.02.2023).

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: doi.org/10.5194/tc-13-2043-2019.

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.

WGMS 1991. Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989). IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.

WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). ICSU (WDS)-IUGG (IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.

WGMS 2015. Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013). ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2015. 230 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2015-11.

WGMS 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015). ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2017. 244 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2017-10.

WGMS 2020. Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2020. 274 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12.

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

Catalogue of glaciers of the USSR. V. 16. Iss. 1. Part 3–5. Iss. 2. Part 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 80 p. 64 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.
- 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.
- IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
- Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V.* Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. *Regional Environmental Change*, 2019. V. 19. P. 1229–1247. DOI: 10.1007/s10113-018-1446-z.
- Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Ya., 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*, 2019. V. 25. Part 2. P. 146–160 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.
- Kitov A.D., Plyusnin V.M., Ivanov E.N., Batuev D.A., Kovalenko S.N.* The internet presentation of databases of glaciers of the south of eastern Siberia. *InterCarto. InterGIS*, 2017. V. 23. Part 2. P. 228–242 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.
- Kotlyakov V.M., Chernova L.P., Muraviev 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. 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.
- Otgonboyar D.* Water-glacial resources of endorheic regions of Western Mongolia: Modern assessment and tendencies of change. Author's abstract of the dissertation for the degree of PhD of geographical sciences. Barnaul: Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 2012. 24 p. (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., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Konovalov V., Bris R. Le., Molg N., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Rastner P., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 2013. V. 54. P. 171–182. DOI: 10.3189/2013AoG63A296.

Paul F., Bolch T., Briggs K., Käab 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: doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038.

Peretolchin S.P. *Glaciers of the Munku-Sardyk Range*. News of the Tomsk Technical Institute. V. 9. Tomsk: Typolitography of the Siberian Printing Association, 1908. 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*, 2010. 15 p. Web resource: http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf (accessed 05.02.2023).

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: doi.org/10.5194/tc-13-2043-2019.

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.

WGMS 1991. *Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989)*. IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.

WGMS 2013. *Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011)*. ICSU (WDS)-IUGG (IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.

WGMS 2015. *Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013)*. ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2015. 230 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2015-11.

WGMS 2017. *Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015)*. ICSU(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2017. 244 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2017-10.

WGMS 2020. *Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017)*. ISC(WDS)-IUGG(IACS)-UNEP-UNESCO-WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2020. 274 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12.

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.