

УДК 911.2

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-589-602

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

## ДИНАМИКА ОТДЕЛЬНЫХ ЛЕДНИКОВ МАССИВА МУНКУ-САРДЫК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН) И ХРЕБТА КАРЛЫКТАГ (ВОСТОЧНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

### АННОТАЦИЯ

Более десяти лет рассматриваются локальные особенности оледенения отдельных горных массивов внутриконтинентальной части Азии на примере трансграничного трансекта от широт средней тайги Прибайкалья, захватывая Монгольский Алтай, до Гималаев, и представляются в материалах конференций «ИнтерКарто. ИнтерГИС». Ледники Восточного Тянь-Шаня интересны как часть этого трансекта, расположенного в пустынной и полупустынной зонах. В литературе преимущественно рассматривается динамика ледников центральной части Тянь-Шаня, в районе Урумчи. В северной части трансекта наиболее изучены ледники в Восточном Саяне (нивальные-гляциальные объекты хребта Мунку-Сардык). Динамика этих ледников представлена более чем за 100 лет. В данной работе рассмотрены изменения ледника при главной вершине горного массива Мунку-Сардык (ледник Перетолчина) и малоизученного ледника при наивысшей вершине хребта Карлыктаг аналогичной северной экспозиции. Оценивая весь трансект, можно отметить, что для ледников северной части трансекта (начиная от хребта Кодар) характерно существенное сокращение в толщину по сравнению с их площадными изменениями и повышение скорости бронирования поверхностными моренами. Бронирование моренами нижней части ледника Карлыктаг также происходит, но не столь существенно как у ледника Перетолчина. Сравнение динамики ледника Карлыктаг и ледника Перетолчина по данным дистанционного зондирования Земли Landsat показывает, что ледники сокращаются в разной степени. Открытая часть ледника Перетолчина от конечной морены стадии Фернау уменьшилась как по площади, так и длине примерно в два раза. Ледник Карлыктаг сократился в длину примерно на 25 %. Он существенно сокращался по длине в начале 1970-х до 100 м/год. Уменьшение по площади в среднем проходило со скоростью 0,03 км<sup>2</sup>/год. Ледник Перетолчина за последние 20 лет сокращался по площади со скоростью 0,005 км<sup>2</sup>/год, а за весь период наблюдения с 1900 г. – 0,004 км<sup>2</sup>/год. По длине за этот же период ледник сокращается со скоростью 5 м/год. Выявлены аномальные изменения у рассматриваемых ледников в 2013 и 2021 гг. В эти годы наблюдалось некоторое увеличение ледников. Аналогичные процессы отмечены в южной части трансекта (Гималаи), где после накопления снежно-ледовой массы происходил катастрофический сход ледников в 2014 году (в районе Кхумбу и Лангтанг).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Восточный Саян, Восточный Тянь-Шань, ледник, дистанционные исследования, трансект

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

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

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

**DYNAMICS OF INDIVIDUAL GLACIERS OF THE MUNKU-SARDYK MASSIF (EASTERN SAYAN) AND THE KARLYKTAG RANGE (EASTERN TIEN SHAN)**

**ABSTRACT**

For more than ten years, the local features of the glaciation of individual mountain ranges of the inland part of Asia have been considered on the example of a transboundary transect from the latitudes of the middle taiga of the Baikal region, capturing the Mongolian Altai, to the Himalayas and are presented in the materials of the conferences “InterCarto. InterGIS”. The glaciers of the Eastern Tien Shan are interesting as part of this transect, located in the desert and semi-desert zones. The literature mainly considers the dynamics of glaciers of the central part of the Tien Shan, in the Urumqi region. In the northern part of the transect, the glaciers in the Eastern Sayan (nival-glacial objects of the Munku-Sardyk range) are the most studied. The dynamics of these glaciers is represented for more than 100 years. This paper considers changes in the glacier at the main peak of the Munku-Sardyk mountain range (Peretolchina glacier) and the little-studied glacier at the highest peak of the Karlyktag ridge of a similar northern exposure. Assessing the entire transect, it can be noted that the glaciers of the northern part of the transect (starting from the Kodar Range) are characterized by a significant decrease in thickness compared to their area changes and an increase in the rate of armoring by surface moraines. Moraine armoring of the lower part of the Karlyktag glacier also occurs, but not as significantly as that of the Peretolchina glacier. A comparison of the dynamics of the Karlyktag glacier and the Peretolchina glacier from Landsat remote sensing data shows that glaciers are shrinking to varying degrees. The open part of the Peretolchina glacier from the finite moraine of the Fernau stage decreased both in area and length by about half. The Karlyktag Glacier has decreased in length by about 25 %. It was significantly reduced in length in the early 1970s to 100 m/year. The decrease in area averaged at a rate of 0.03 km<sup>2</sup>/year. Over the past 20 years, the Peretolchina glacier has been shrinking in area at a rate of 0.005 km<sup>2</sup>/year, and for the entire observation period since 1900 – 0.004 km<sup>2</sup>/year. In terms of length over the same period, the glacier is shrinking at a rate of 5 m/year. Anomalous changes were revealed in the glaciers in question in 2013 and 2021. Similar processes were noted in the southern part of the transect (Himalayas) after the accumulation of a snow-ice mass, a catastrophic convergence of glaciers occurred in 2014 (in the area of Khumbu and Langtang).

**KEYWORDS:** Eastern Sayan, Eastern Tien Shan, glacier, transect, remote research

**ВВЕДЕНИЕ**

Малые ледники различных горных массивов наиболее чувствительны к изменениям климата [IPCC, 2007; IPCC, 2021]. Выявление закономерностей колебания малых ледников внутриконтинентальных горных систем на изменения климата – фундаментальная задача географических исследований. Рассмотрение динамики ледников в широтном трансекте позволяет сравнивать такие изменения [Kitov, Plyusnin, 2008] (рис. 1). На протяжении более 10 лет отслеживается динамика ледников Прибайкалья, куда входят такие горные массивы как Кодар, Баргузинский и Байкальский хребты, хребет Мунку-Сардык и Окинский хребет (пик Топографов) Восточного Саяна [Kitov et al., 2009; Котляков и др.,

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

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

2017; Осипов и др., 2017]. Восточный Саян представляет собой сводово-глыбовое нагорье, сложенное в основном метаморфическими породами архея и протерозоя с интрузиями гранитов. Наиболее высокая его юго-восточная часть подвергалась оледенению. Базовым для сравнения принят наиболее изученный за 100 лет горный массив Мунку-Сардык с одноименной вершиной (наибольшей в Восточном Саяне), 3 491 м над уровнем моря (н.у.м.), который находится на границе России и Монголии (см. рис. 1) [Перетолчин, 1908]. Составлены базы данных (БД) ледников Прибайкалья [Китов и др., 2017]. Рассмотрены и отдельные ледники трансекта в южном направлении (Монгольский Алтай, Восточный Тянь-Шань (в районе Урумчи), Гималаи (район Эвереста и Лангтанг) [Китов, Плюснин, 2008; Китов и др., 2019]. Были выявлены корреляции в динамике ледника Азаровой (Кодар) ледника Кхумбу (Гималаи, Непал), что требует дополнительных наблюдений и выявления аналогичных процессов в других горных массивах. Д.А. Ганюшкиным с соавторами [Ганюшкин и др., 2016] был изучен массив Цамбагарав на северо-западе Монголии, попадающий в зону рассматриваемого трансекта. Отмечено сокращение ледников, хотя по площади они сокращаются примерно стабильно – 0,31 км<sup>2</sup>/год, но сокращение в длину интенсивнее от 0,6 м/год в 1820-1968 гг. до 1,8 м/год в 2006–2015 гг. Интересно оценить динамику ледников на крайних территориях горных массивов, каким является самый восточный хребет Карлыктаг Восточного Тянь-Шаня.

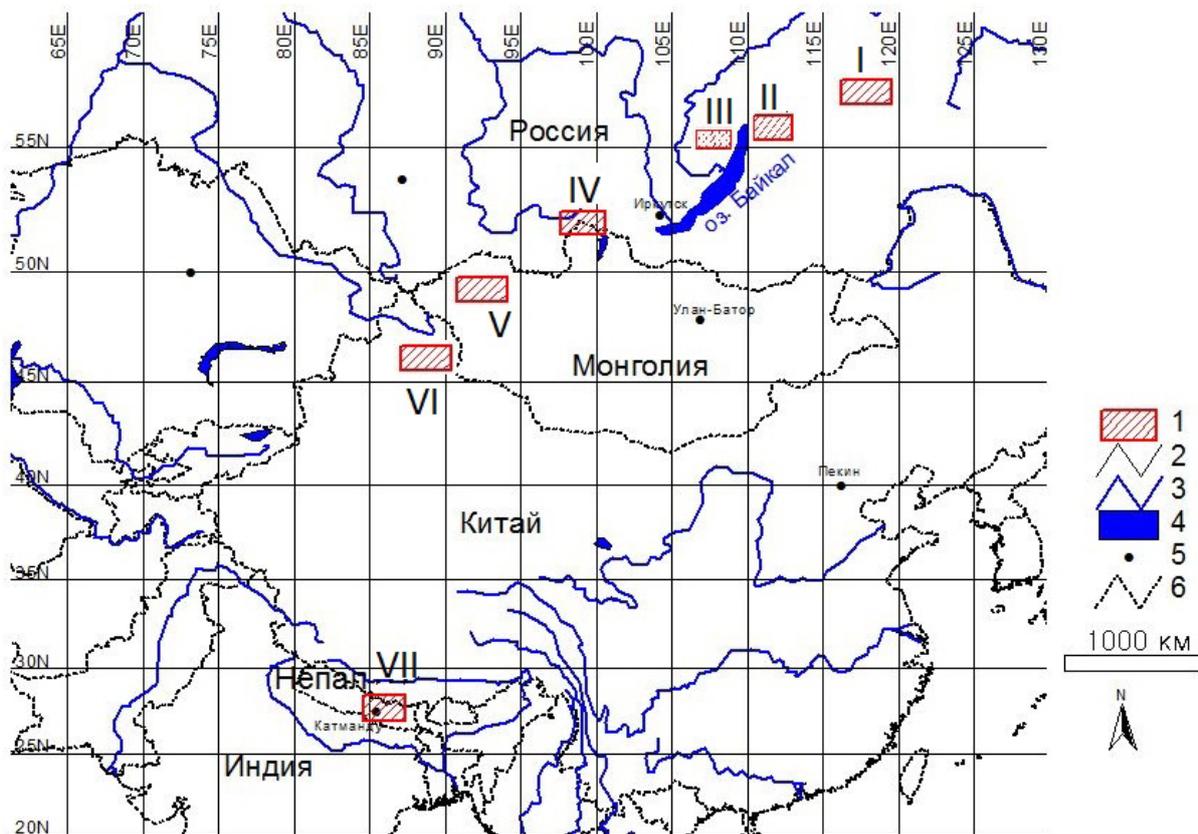


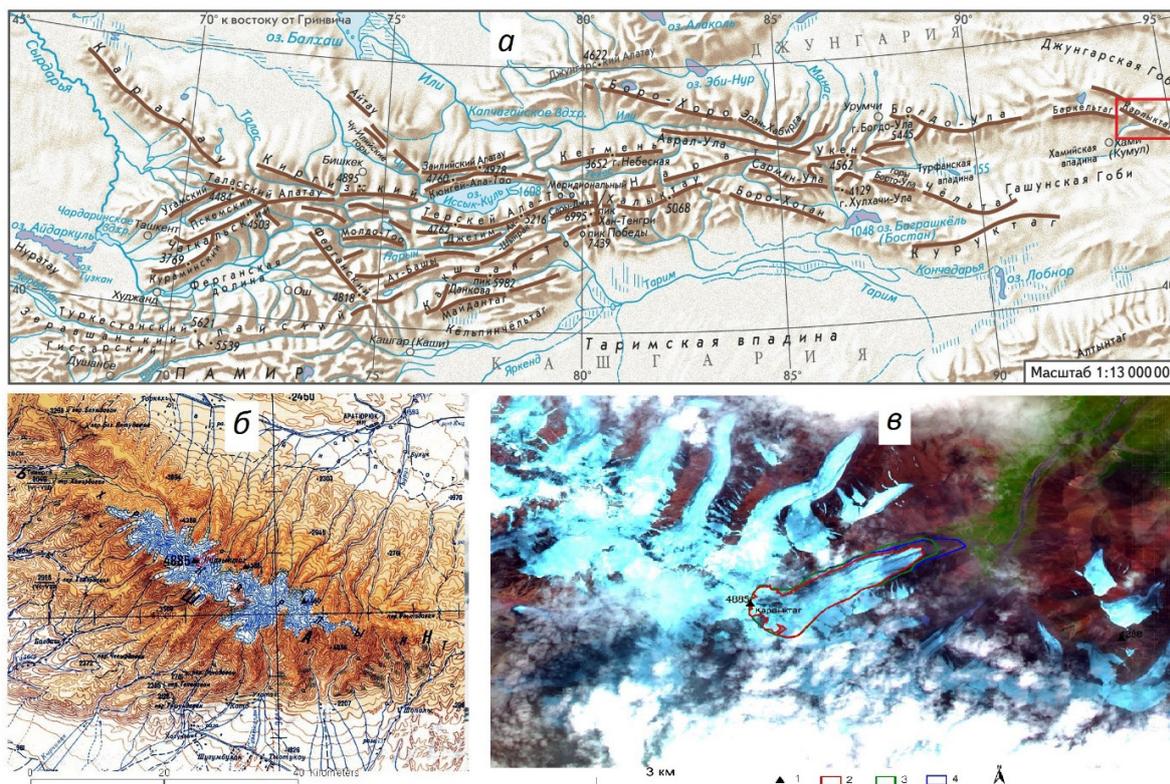
Рис. 1. Общий вид широтного трансекта: 1 – ключевые участки (районы исследования): I – хребет Кодар; II – Баргузинский хребет; III – Байкальский хребет; IV – массив Мунку-Сардык; V – Монгольский Алтай; VI – Восточный Тянь-Шань; VII – Гималаи; 2 – координатная сетка; 3 – реки; 4 – озера; 5 – города; 6 – государственные границы

Fig. 1. General view of the latitudinal transect: 1 – Area of study: I – Kodar Range; II – Barguzin Range; III – Baikal Range; IV – Munku-Sardyk massif; V – Mongolian Altai; VI – Eastern Tien Shan; VII – Himalayas; 2 – coordinate grid; 3 – rivers; 4 – lakes; 5 – cities; 6 – State Borders

Целью исследования является сравнение уже изученных ледников Перетолчина и Радде (массива Мунку-Сардык, Восточный Саян, см. *рис. 1*, ключевой участок IV), с ледниками малоизученной территории Восточного Тянь-Шаня (см. *рис. 1*, ключевой участок VI).

Нами был выбран ледник северо-восточной экспозиции, аналогичной ледникам Мунку-Сардык, стекающий с вершины одноименного горного массива – г. Карлыктаг, 4 885 м. (*рис. 2*). К сожалению, из-за облачности на космических снимках пришлось ограничиться одним характерным ледником этого горного массива.

Для этой цели были обновлены характеристики ледников Радде и Перетолчина по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а для хребта Карлыктаг были подобраны данные ДЗЗ типа Landsat как можно более раннего периода, с учетом небольшой облачности и сезонной представительности ледника.



*Рис. 2. Тянь-Шань, хребет Карлыктаг: а – орографическая схема Тянь-Шань; б – хребет Карлыктаг на топокарте; в – ледник CN5Y711C0003 (Карлыктаг), данные Landsat*

*Fig. 2. Tien-Shan, Karlyktag Ridge: а – the orographical scheme of Tien Shan; б – the Karlyktag ridge on the topographic map; в – glacier CN5Y711C0003 (Karlygtag), data Landsat*

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения динамики и инвентаризации современного состояния ледников Мунку-Сардык использованы разномасштабные (с разным пространственным разрешением) космоснимки, полученные со спутников Quick Bird, Pleiades, Landsat-4, -5, -7, -8, и доступные в интернете картографические материалы. Для горного массива Карлыктаг доступной была топографическая карта масштаба 1:500 000, год издания 1972 (вероятно аэросъемка проводилась в 1960-х годах). Для определения изменения ледника Карлыктаг использовались данные Landsat-1, -2, -5, -7, -8, с сайта Геологической службы США с 1973 по 2021 гг. (*табл. 1*).

Табл. 1. Данные Landsat на территорию хребта Карлыктаг  
Table 1. Landsat data on the territory of the Karlyktag Range

Год съемки	Кадр Landsat	Пространственное разрешение, м	Пригодность использования
1973	LM01_L1TP_148030_19731031	80	Заснежено
1977	LM02_L1TP_148030_19770826	60	Хороший
1977	LM02_L1TP_149030_19770809	60	Удовлетворительный
1986	LT05_L1TP_138030_19860714	30	Хороший
1989	LT05_L1TP_138030_19890823	30	Хороший
2000	LE07_L1TP_138030_20000712	15	Хороший
2006	LE07_L1TP_138030_20060814	15	Хороший
2010	LE07_L1TP_138030_20100825	15	Хороший
2013	LE07_L1TP_138030_20130801	15	Хороший
2014	LC08_L1TP_138030_20140727	15	Хороший
2015	LC08_L1TP_138030_20150831	15	Облачность
2015	LC08_L1TP_138030_20150916	15	Заснежено
2019	LC08_L1TP_138030_20190810	15	Хороший
2020	LC08_L1TP_138030_20200727	15	Хороший
2021	LC08_L1TP_138030_20210815	15	Облачность
2021	LC08_L1TP_138030b20210730	15	Облачность

В таблице в названии кадра указан номер спутника Landsat и дата съемки (LM01, 02 – Landsat-1 и 2; LT05 – Landsat-5; LE07 – Landsat-7; LC08 – Landsat-8; последнее число – дата съемки, например, 19731031 – 1973 год, октябрь, 31 число).

Границы и площадь наиболее раннего состояния ледника пришлось определять по топокарте 1972 г., хотя и нашелся безоблачный снимок 1973 г., но осенней съемки, когда уже был постоянный снежный покров. Оптимальное временное окно, когда можно определить состояние ледника в данном году, всего около 1 месяца – примерно с последней декады июля до 20-х чисел августа. Дополнительно накладывается облачность, а периодичность съемки спутника Landsat – полмесяца. Поэтому приходилось иногда векторизовать по комбинации кадров разных близких дат съемки данного года.

Космические снимки были привязаны к топографической карте масштаба, соответственно, 1:100 000 и 1:500 000, и приведены в единую проекцию WGS-84, зона 47 (для Мунку-Сардык) и 46 (для Карлыктаг). Дешифрирование и векторизация границ объектов проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков, каналы 2-4-7 для Landsat-2, 5, 7 и 3-5-7 для Landsat-8 с улучшением до 15 м по каналу 8 (для Landsat-7, -8). Все измерения выполнялись в программе ArcView GIS-3.2a. Учитывая разрешение снимков 15 м/пиксель, систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км<sup>2</sup> или 5 % от измеряемой величины. Для снимков Landsat-2, -5 с разрешением 60 и 30 м/пиксель точность определения площади порядка 10–20 %. Также использовались наземные снимки для детального морфологического изучения объектов.

Первоначально было решено при векторизации верхней части ледника проводить границу через главную вершину (4 885 м) так, чтобы она совпадала с выделением ее по топокарте. Однако при векторизации снимков последних лет оказалось, что ледник изменяется и в самой высшей части – обнажились краевые скалы, появились нунатаки. Поэтому пришлось учитывать эти изменения. Также не учитывались притоки ледника. Линия проводилась между склонами по краю ледника, как бы отсекая притоки (тем более, что в последние годы они превратились в отдельные леднички). То есть выделялось и

оценивалось основное тело ледника без учета его притоков. Выделять краевые скалы и нунатаки начали примерно с 2000 года. Они также вычитались из общей площади ледника.

Навигационная информация (для ледников Мунку-Сардык) собиралась с помощью портативных GPS-приемников Garmin GPSmap-64st. Запись приемником велась в формате WGS-84 десятичных градусов. Также использовались характеристики ледников из БД Института географии РАН (Каталоги ледников СССР) и электронные БД, в том числе World Glacier Inventory (WGI). Идентификатор ледника в WGI аналогичен коду в каталоге ледников СССР и для выбранного ледника Карлыктаг – CN5Y822A0003. Код ледников Перетолчина и Радде соответственно – SU5B16201031 и SU5B16201030 [Каталог, 1973].

Картографирование выполнялось с использованием ГИС-технологий: выполнена векторизация границ ледников и определены характеристики ледников.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате ГИС-анализа оценивалась площадь открытой части ледника и ее длина (табл. 2).

Табл. 2. Динамика ледника Карлыктаг  
Table 2. The Karlyktag Glacier dynamics

Year	S, km <sup>2</sup>	dA, %	VS <sub>Y</sub>	L, km	dL, %	VLY	Data
1972	3,75	23,51	—	4,70	3,40	—	Map
1977	3,61	16,72	-0,03	4,14	2,90	-111,24	Landsat-2
1986	3,37	8,82	-0,03	4,11	1,46	-3,59	Landsat-5
1989	3,33	8,82	-0,01	4,07	1,47	-12,98	Landsat-5
2000	3,25	4,66	-0,01	3,97	0,75	-8,88	Landsat-7
2006	3,05	4,94	-0,03	3,95	0,76	-4,35	Landsat-7
2010	2,94	5,21	-0,03	3,92	0,76	-6,21	Landsat-7
2013	3,17	5,53	0,08	3,91	0,77	-4,44	Landsat-7
2014	2,92	5,75	-0,26	3,89	0,77	-21,33	Landsat-8
2019	2,82	5,59	-0,02	3,85	0,78	-7,40	Landsat-8
2021	2,85	5,59	0,01	3,84	0,78	-5,70	Landsat-8

Year – год получения данных; S – площадь ледника в км<sup>2</sup>; dA – точность определения площади ледника с учетом пространственного разрешения исходных данных в процентах; VS<sub>Y</sub> – скорость изменения площади ледника км<sup>2</sup>/год; L – длина ледника в км; dL – точность определения длины с учетом пространственного разрешения данных в процентах; VLY – скорость изменения длины ледника м/год; Data – вид исходных данных (Map – топографическая карта; Landsat-N соответствующие данные со спутника Landsat).

Начальное состояние ледника по топографической карте определялось довольно грубо. Хотя карта и датирована началом 1970-х гг., но, вероятно, данные соответствуют более ранним годам. На космоснимках видно, что моренное поле конечных морен совпадает с рисовкой на топографической карте. Поэтому скорость сокращения ледника в длину до 1977 г. должна быть в 2–3 раза меньше. Хотя отмечается, что с 1970-х по 2000 гг. наблюдается повышенный отрицательный масс-баланс в Центральной Азии [WGMS, 2021]. Наблюдения изменения ледников показывают их общее отступление с начала двадцатого столетия с некоторыми наступаниями около семидесятых годов [Solomina, 2000; Su, Shi, 2002; Kutuzov, 2005]. В то же время, судя по тем же моренам, площадь ледника должна быть больше. По данным БД WGI, ссылающейся на фотосъемку 1971 г., общая

площадь ледника Карлыктаг составляет 5,23 км<sup>2</sup>, вероятно, с притоками, а максимальная длина – 5,5 км (при этом дополнительно указана длина 3,8 км, что соответствует длине открытой части). Верх ледника находится на высоте 4 850 м., низ – на 3 570 м. Снеговая линия определена на уровне 4 130 м.

Как видно из таблицы, скорость сокращения ледника до 2006 г. была значительно меньше (0,03 км<sup>2</sup>/год), чем в последующие годы. Ледник в 2013 г. даже увеличился на 0,23 км<sup>2</sup> по сравнению с 2010 г. В 2014 г. скорость таяния резко увеличилась, но к настоящему времени снова уменьшилась до средней величины – 0,01 км<sup>2</sup>/год. В длину ледник изменялся неравномерно. Резко уменьшался в длину к 1989 г., почти на 13 м/год, замедлилось таяние к 2013 г. до 4,4 м/год, и уже к следующему году возросло до 21 м/год. К настоящему времени уменьшение ледника в длину составляет 5,7 м/год. По сравнению с ледником Перетолчина, сократившимся по площади и длине открытой части (от конечной морены стадии Фернау) в 2 раза, ледник Карлыктаг уменьшился по длине всего на 25 %. С 2000-х гг. в сокращение площади ледника стали вносить заметный вклад расширяющиеся зоны нунатаков и склонов, особенно юго-восточной экспозиции.

Изменения ледника в верхней и нижней части представлены на рис. 3, 4.

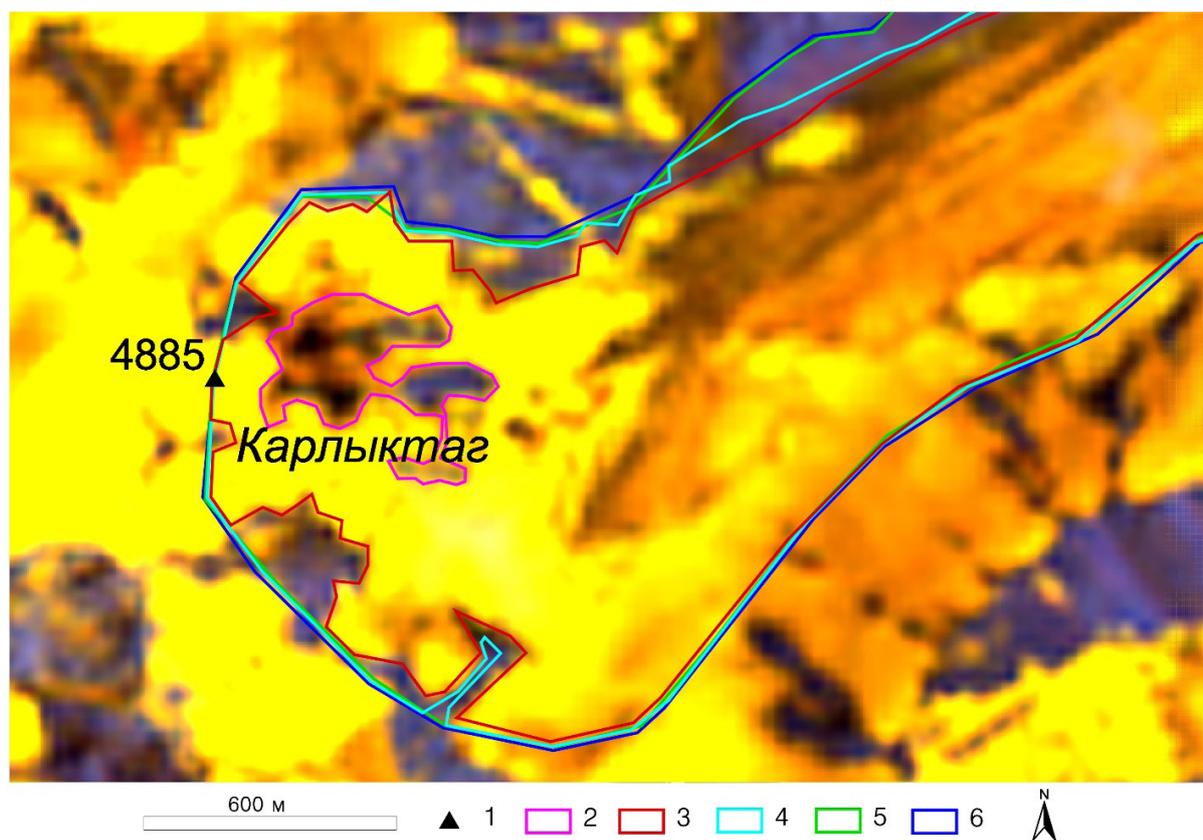


Рис. 3. Верхняя часть ледника. Изменения нунатаков и появление скал на границе ледника в разные годы. 1 – вершина; 2 – граница области нунатаков; 3 – граница современного состояния ледника, 2021 г.; 4 – граница ледника, 2013 г.; 5 – граница ледника, 1977 г.; 6 – граница ледника до 1972 г. по топографической карте. Фон – космоснимок Landsat-8 30.07.2021, синтез каналов 3, 5, 7.

Fig. 3. Upper part of the glacier. Changes in nunataks and the appearance of rocks on the border of the glacier in different years. 1 – top; 2 – border of nunataks region; 3 – the boundary of the current state of the glacier, 2021; 4 – glacier boundary, 2013; 5 – glacier boundary, 1977; 6 – the boundary of the glacier before 1972 according to the topographic map. Background – Landsat-8 satellite image on 7/30/2021, synthesis of channels 3, 5, 7.

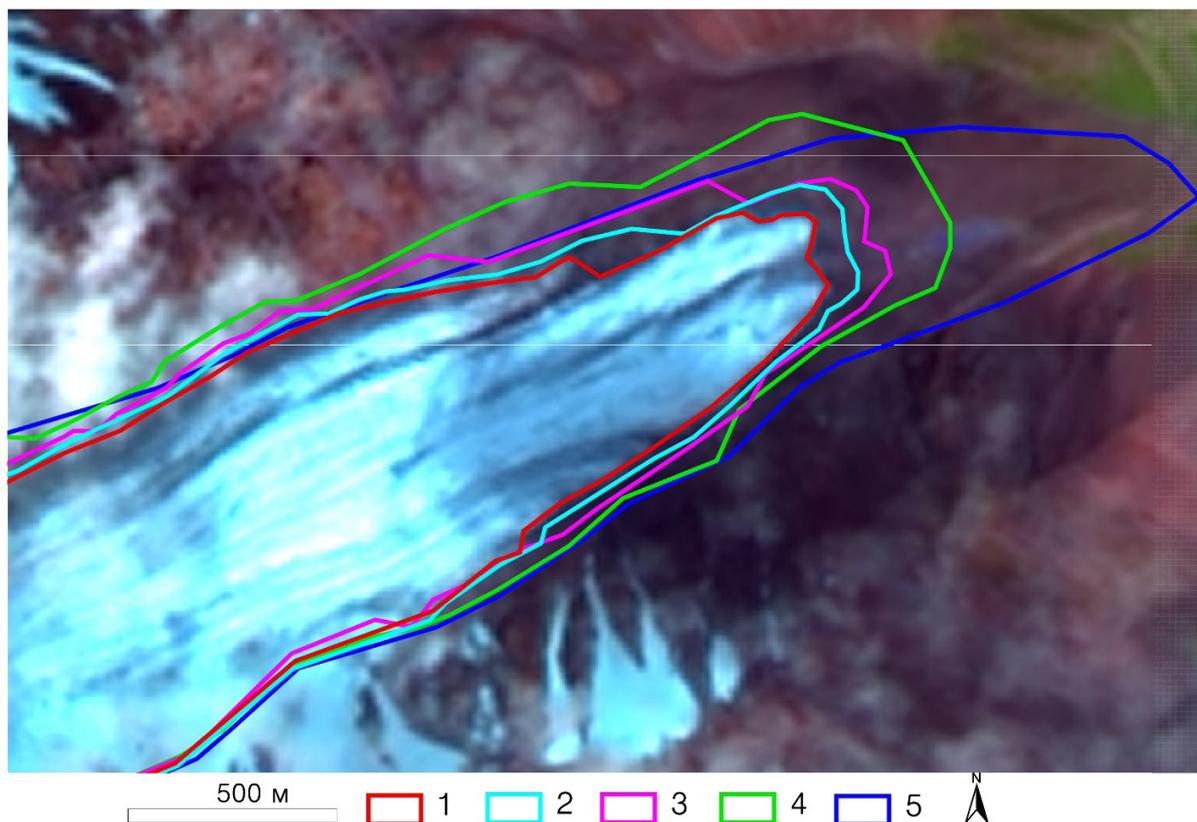


Рис. 4. Изменение языка ледника с 1972 по 2021 гг. 1 – 2021 г.; 2 – 2013 г.; 3 – 2000 г.; 4 – 1977 г.; 5 – до 1972 г., согласно топографической карте. Фон – космоснимок Landsat-8 15.08.2021, синтез каналов 3, 5, 7, 8.

Fig. 4. Change in glacier tongue from 1972 to 2021: 1 – 2021; 2 – 2013; 3 – 2000; 4 – 1977; 5 – before 1972, according to the topographic map. Background – landsat-8 satellite image on 8/15/2021, synthesis of channels 3, 5, 7, 8.

По данным Landsat изменение ледников массива Мунку-Сардык (табл. 3) имеет схожий характер (см. табл. 2). 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].

Табл. 3. Изменение площади ледников массива Мунку-Сардык по данным Landsat, км<sup>2</sup>  
Table 3. Change in the area of glaciers of the Munku-Sardyk massif according to Landsat, km<sup>2</sup>

Год	Пограничный	Радде	Перетолчина Северный	Перетолчина Южный
2000	0,12	0,19	0,42	0,20
2006	0,09	0,19	0,37	0,16
2014	0,14	0,20	0,39	0,18
2015	0,07	0,10	0,30	0,11
2018	0,05	0,09	0,26	0,05
2020	-	0,05	-	-
2021	0,12	0,06	0,31	0,22

Нами была проведена с помощью ГИС по данным ДЗЗ Quick Bird и схеме С.П. Перетолчина [Перетолчин, 1908] реконструкция северного ледника Перетолчина на 1900 г. Его площадь составила 0,82 км<sup>2</sup>, а длина 1,47 км. В каталоге [Каталог, 1973] по

аэро съемке 1950-х гг. площадь ледника составляла 0,7 км<sup>2</sup>, а длина 1,1 км. Наименьшая площадь открытой части была в 2018 г. – 0,26 км<sup>2</sup> и длина 0,8 км. Тогда скорость сокращения ледника за первые 100 лет наблюдения составила по площади – 0,004 км<sup>2</sup>/год и по длине – 5,3 м/год (в 2000 г. длина ледника – 0,94 км). А за весь период наблюдения до минимального размера ледника скорость составила – 0,005 км<sup>2</sup>/год и 5,6 м/год. Ледник Перетолчина сокращается почти в 10 раз медленнее ледника Карлыктаг. В первые 50 лет прошлого столетия сокращение ледника Перетолчина было еще медленнее – 0,002 км<sup>2</sup>/год. Однако по длине ледник Карлыктаг в отдельные годы сокращался так же, как и ледник Перетолчина.

Аномальная динамика ледников Мунку-Сардык – аналогична динамике в горах Тянь-Шань. К 2014 г. наблюдается увеличение площади всех ледников и резкое их сокращение с 2015 г. В 2021 г. также отмечается некоторое увеличение площади ледников. Не удалось получить безоблачные снимки в оптимальное время в 2013, 2019 и 2020 гг., хотя по наземным наблюдениям многолетние снежники и фирновые поля ледников увеличивались. В аномальные годы наблюдаются изменения в метеорологических показателях (рис. 5).

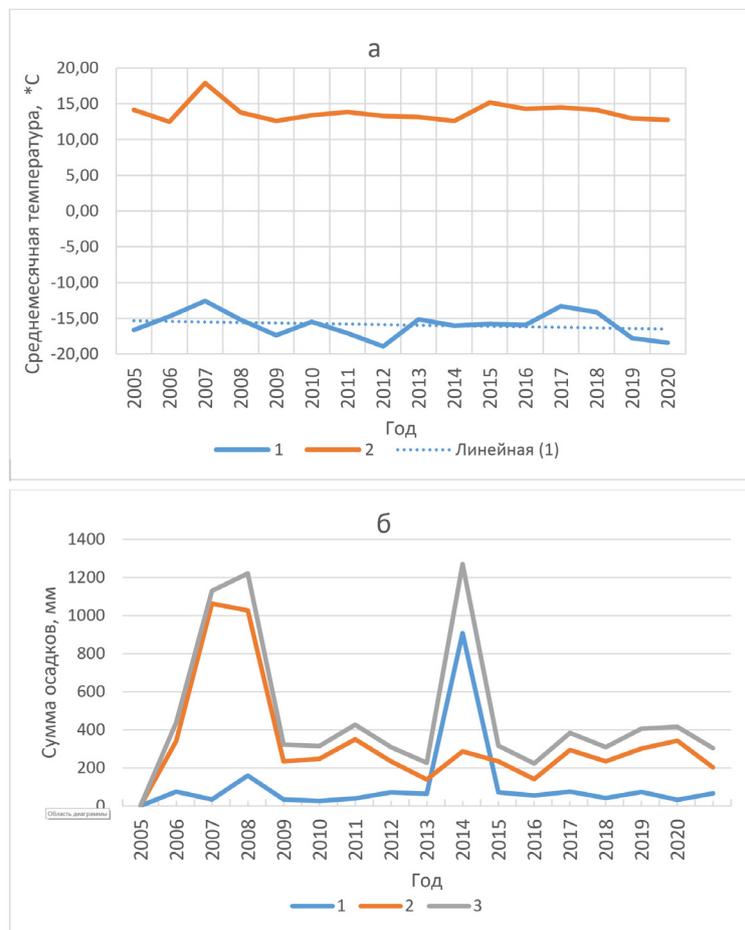


Рис. 5. Климатические характеристики в районе массива Мунку-Сардык по ближайшей метеостанции Монды, 2005–2020 гг.: а – зимние (1) и летние (2) среднемесячные температуры (соответственно за ноябрь, декабрь, январь, февраль и за июнь, июль, август; пунктирная линия – тренд зимних температур); б – сумма осадков (1 – холодных месяцев сентябрь-декабрь, январь-март; 2 – теплых – май – август, 3 – за весь год)

Fig. 5. Climatic characteristics in the area of the Munku-Sardyk massif 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)

Тренд температур имеет тенденцию к понижению, так же, как и осадков. В основном в этом районе осадки выпадают в летний период (июнь–август). В 2013–2014 гг. прослеживается резкое увеличение зимних осадков, а также небольшое понижение зимних температур. Аналогичные изменения по годовой сумме осадков наблюдались в 2006–2007 гг., но без аномального их увеличения зимой. В то же время, летние и зимние температуры росли. Вероятно, это не способствовало замедлению сокращения ледников в начале 2000-х гг.

Одной из основных характеристик ледников является масс-баланс водного эквивалента. Однако постоянное наблюдение и измерение этого параметра ведется в основном на крупных ледниках. Результаты таких измерений публикуются в специальных бюллетенях [WGMS, 1991; WGMS, 2013]. Если в первых 12 номерах рассматривался в основном масс-баланс и изменения ледников в десяти избранных горных регионах, то с 2013 гг. Бюллетень стал отражать изменения ледников в семнадцати горных регионах и более детально около двадцати избранных ледников [WGMS, 2015; WGMS, 2017; WGMS, 2020; WGMS, 2021]. Также обновляются электронные БД ледников, на которые есть ссылки из Бюллетеня. В Восточном Тянь-Шане детальный мониторинг ведется на леднике Урумчи, № 1, находящемся в наиболее высокой центральной части хребта. Наблюдения за этим ледником ведутся с 1959 г. В первых опубликованных данных по масс-балансу 1987/88 гг. его площадь составляла 1,84 км<sup>2</sup>, а линия равновесия (ELA) отмечалась на высоте 4 000 м. [WGMS, 1991]. В 1993 г. ледник разделился на два независимых ледника и по данным 2011/12 гг. площадь восточного составляла 1,068 км<sup>2</sup>, а западного – 0,578 км<sup>2</sup> [WGMS, 2013]. По последним данным [WGMS, 2021] ледники сократились: восточный – до 1,021 км<sup>2</sup>, западный до 0,537 км<sup>2</sup>, а ELA поднялась до 4 047 м. Ледник за последние 24 года по общей площади сокращался со скоростью 0,01 км<sup>2</sup>/год. Это примерно в 2–3 раза медленнее сокращения ледника Карлыктаг (см. табл. 2) и значительно медленнее ледников Мунку-Сардык (см. табл. 3). Ледники Монголии [Ганюшкин и др., 2016] сокращаются в том же темпе, как и ледники Мунку-Сардык.

Величина масс-баланса хорошо коррелирует с положением линии баланса (ELA). Она представляет ключевой показатель состояния ледника. Для ледников Мунку-Сардык в оптимальный период такой линии практически нет – ледники лежат значительно ниже границы хионосферы. Однако ледники существуют. Для ледника Карлыктаг по данным БД WGI снеговая линия в 1972 г. зафиксирована на уровне 4 130 м. Но по данным ДЗЗ она поднялась до 4 200 м к 2021 г. В 2013 г. (аномальный) снеговая линия опускалась до 4 100 м.

## ВЫВОДЫ

Мониторинг на основе информации ДЗЗ позволяет количественно оценить динамику ледников различных горных систем. В результате ГИС-анализа выявлены общие тенденции изменения открытой части ледников в горном массиве Мунку-Сардык и хр. Карлыктаг в Восточном Тянь-Шане. Выявлены аномальные изменения в период 2013–2015 гг. К 2014 г. во многих горных системах происходило накопление снега. Это выявлено в Гималаях (ледники Лангтанг, Кхумбу) [Китов и др., 2019], в Восточном Саяне (см. табл. 3). Такое же явление наблюдалось и в Восточном Тянь-Шане на примере ледника Карлыктаг (см. табл. 2). В 2015 г. скорость сокращения ледников увеличилась, как бы компенсируя предыдущее замедление. На леднике Карлыктаг в верхней его части ниже главной вершины обнажились нунатаки. Их площадь увеличилась с 0,02 км<sup>2</sup> (2000 г.) до 0,1 км<sup>2</sup> (2021 г.). В 2010 г. их площадь была 0,07 км<sup>2</sup>, в 2013 г. – 0,02 км<sup>2</sup>, а в 2015 г. резко увеличилась до 0,08 км<sup>2</sup>, не считая скал у краев ледника. В длину ледник постоянно сокращался, к 2010 г. он уменьшился на 25 м, в 2013 г. только на 13 м, а уже в 2014 г. на 21 м. По площади в 2013 г. ледник даже увеличился на 0,23 км<sup>2</sup>, тогда как в 2010 г. он сократился на 0,11 км<sup>2</sup>, а в 2014 г. сократился на 0,26 км<sup>2</sup>. Аналогичное увеличение ледника на 0,03 км<sup>2</sup> выявлено в 2021 г. По нашим наблюдениям в горах

Восточного Саяна в 2020–2021 гг. также наблюдается замедление сокращения ледников и увеличение многолетних снежников.

Рассматриваемые ледники в хребтах Мунку-Сардык и Карлыктаг сокращаются, но с различной скоростью. Несомненно, абсолютные величины изменения ледника Карлыктаг превышают аналогичные величины изменения ледников Мунку-Сардык, но относительные величины разные. Ледники Перетолчина и Радде сокращаются значительно медленнее, чем Карлыктаг. Например, за последние 20 лет (как следует из табл. 2, 3), ледник Карлыктаг сокращался по площади со скоростью 0,02 км<sup>2</sup>/год, а ледники Перетолчина Северный и Радде – по 0,0055 и 0,0065 км<sup>2</sup>/год, соответственно. Ледники массива Цамбагарав сокращаются еще быстрее – по 0,31 км<sup>2</sup>/год [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, менее подвергаются тепловому воздействию. Таким образом, наблюдаются некоторые схожие процессы динамики ледников в горах Восточного Саяна и восточной оконечности Тянь-Шаня.

Вероятно, в дальнейшем ледники будут сокращаться в том же темпе. В шестом докладе по климату [IPCC, 2021] сообщается, что с 1850 г. по настоящее время средняя континентальная температура выросла на 1,5 °С, а к 2025 г. может подняться до 2–3 °С. Ледники больше всего потеряли в массе с 2010 по 2019 гг. по сравнению с предыдущими десятилетиями наблюдения. Там же показаны аномальные температуры. С 1900 по 1990 гг. аномалии температуры были как положительные, так и отрицательные с небольшим перевесом положительных. После 1990 г. положительные аномалии резко увеличиваются. 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 carried out at the expense of the state task (subject No. АААА-А21-121012190017-5); supported by the Russian Foundation of Basic Research, grant No. 20-05-00253А “Transformation of geosystems of the Baikal natural area”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 64 с.
3. Китов А.Д., Плюснин В.М. Особенности локальных гляциологических явлений в горных ландшафтах (на примере Байкало-Урумчинского трансекта). Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Материалы международной конференции. ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2014, Саратов – Урумчи, 24–26 июня 2008 г., Т. 1. Саратов: Международная картографическая ассоциация, 2008. С. 130–137.
4. 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. 23. № 2. С. 228–242. DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.
5. Китов А.Д., Плюснин В.М., Биличенко И.Н. Изменение ледников в Гималаях и Южной Сибири по данным Landsat. ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2019. Т. 25. № 2. С. 146–160. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-146-160.

6. *Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М.* Изменения 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.
7. *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.
8. *Перетолчин С.П.* Ледники хребта Мунку-Сардык. Изв. Томск.техн. ин-та. Т. 9. Томск: Типолитография Сиб. т-ва печатного дела, 1908. 60 с.
9. 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: Published by IPCC, 2007. 996 p.
10. 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: Published by IPCC, 2021. 2337 p.
11. *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.
12. *Kutuzov S.* The retreat of Tien Shan glaciers (Central Asia) since the “Little Ice Age” obtained from moraine positions, aerial photographs and satellite images. PAGES 2nd Open Science Meeting. Beijing, China. 10–12 August 2005. P. 138.
13. *Solomina O.* Retreat of mountain glaciers of northern Eurasia since the Little Ice Age maximum. *Annals of Glaciology*, 2000. V. 31. P. 26–30.
14. *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.
15. WGMS 1991. Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989). Haeberli W., Herren E. (eds.), IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.
16. WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). Zemp M., Nussbaumer S.U., Naegeli K., Gärtner-Roer I., Paul F., Hoelzle M., Haeberli W. (eds.), ICSU (WDS), IUGG (IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.
17. WGMS 2015. Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013). Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hüsler F., Machguth H., Mölg N., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ICSU(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2015. 230 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2015-11.
18. WGMS 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015). Zemp M., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Huber J., Machguth H., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ICSU(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2017. 244 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2017-10.
19. WGMS 2020. Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Bannwart J., Rastner P., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ISC(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2020. 274 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12.
20. WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). Zemp M., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Bannwart J., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ISC(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

## REFERENCES

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

2. IPCC. Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: Published by IPCC, 2007. 996 p.
3. 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: Published by IPCC, 2021. 2337 p.
4. *Kitov A.D., Plyusnin V.M.* Features local glaciological phenomena in mountain landscapes (on example Baikal-Urumchi transect). Sustainable development of territories: GIS theory and practical experience. Materials of the international conference. InterCarto, InterGIS-14, Saratov-Urumqi, June 24–26, 2008, V. 1. Saratov, 2008. P. 130–137 (in Russian).
5. *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.
6. *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. Proceedings of the International conference InterCarto. InterGIS. 2017. V. 23 No. 2. P. 228–242 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-2-23-228-242.
7. *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.
8. *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. Journal Ice and Snow, 2017. V. 57. No. 4. P. 453–467 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-453-467.
9. *Kutuzov S.* The retreat of Tien Shan glaciers (Central Asia) since the “Little Ice Age” obtained from moraine positions, aerial photographs and satellite images. PAGES 2nd Open Science Meeting. Beijing, China. 10–12 August 2005. P. 138.
10. *Osipov E.Y., Osipova O.P., Klevtsov E.V.* Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveys. Journal Ice and Snow, 2017. V. 57. No. 4. P. 483–497 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497.
11. *Peretolchin S.P.* Glaciers of the Munku-Sardyk ridge. Izv. Tomsk.techn. in-ta. V. 9. Tomsk: Typolithography Sib. t-va pechatnogo dela, 1908. 60 p. (in Russian).
12. *Solomina O.* Retreat of mountain glaciers of northern Eurasia since the Little Ice Age maximum. Annals of Glaciology, 2000. V. 31. P. 26–30.
13. *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.
14. USSR Glacier Inventory. V. 16. Iss. 1. Part. 3–5. Iss. 2. Part. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973. 64 p. (in Russian).
15. WGMS 1991. Glacier Mass Balance Bulletin No. 1 (1988–1989). Haeberli W., Herren E. (eds.), IAHS (ICSU)-UNEP-UNESCO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 1991. 70 p.
16. WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). Zemp M., Nussbaumer S.U., Naegeli K., Gärtner-Roer I., Paul F., Hoelzle M., Haeberli W. (eds.), ICSU (WDS), IUGG (IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013. 106 p.
17. WGMS 2015. Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013). Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hüsler F., Machguth H., Mölg N., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ICSU(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2015. 230 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2015-11.
18. WGMS 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015). Zemp M., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Huber J., Machguth H., Paul F., Hoelzle M. (eds.),

ICSU(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2017. 244 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2017-10.

19. WGMS 2020. Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Bannwart J., Rastner P., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ISC(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2020. 274 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2019-12.

20. WGMS 2021. Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). Zemp M., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Bannwart J., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ISC(WDS), IUGG(IACS), UNEP, UNESCO, WMO. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2021. 278 p. DOI: 10.5904/wgms-fog-2021-05.

---